



TITLE:

大規模システムにおける故障影響波及範囲予測と故障原因推定に関する研究(Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

宮崎, 聡

---

CITATION:

宮崎, 聡. 大規模システムにおける故障影響波及範囲予測と故障原因推定に関する研究. 京都大学, 1988, 工学博士

ISSUE DATE:

1988-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6650>

RIGHT:

大規模システムにおける  
故障影響波及範囲予測と  
故障原因推定に関する研究

昭和63年5月

宮崎 聡

大規模システムにおける  
故障影響波及範囲予測と  
故障原因推定に関する研究

昭和63年5月

宮崎 聡

DOC
1988
9
電気系

# 目次

	ページ
第1章 序論	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 従来の研究	3
1.3 本論文の概要	12
第2章 故障影響波及範囲予測法	14
2.1 緒言	14
2.2 大規模システムにおける故障影響波及過程のネットワークモデル化	15
2.3 故障影響波及範囲予測法の提案	17
2.4 結言	26
第3章 故障原因推定法	27
3.1 緒言	27
3.2 時間・確率付有向グラフ逆方向探索による故障原因推定法の提案	29
3.3 センサ故障を含む条件下での故障原因推定法の提案	45
3.4 センサ出力パターン照合形故障原因推定法の提案	54
3.5 結言	68
第4章 原子力発電支援システムへの適用	69
4.1 緒言	69
4.2 インストラクションシステム	70
4.3 故障波及予測・診断システム	75
4.4 結言	84
第5章 予防保全設計への適用	85
5.1 緒言	85
5.2 火力発電プラント用液化石油ガス気化設備への適用	86
5.3 冷熱発電プラントへの適用	89
5.4 原子力プラント再循環系への適用	93
5.5 診断精度事前評価法の提案	96
5.6 結言	102
第6章 結論	103
謝辞	106
参考文献	107
付録	112
付録1 Dijkstra法	112
付録2 Floyd法	114

# 記号および略号

## 記号

$V$  : すべてのノード集合

$S(CV)$  : センサノード集合

$F(CV)$  : 故障原因候補ノード集合

$M(t)(CS)$  : 最初の異常検出から経過時間  $t$  までに異常検出したセンサノード集合

$N(t)(CS)$  : 最初の異常検出から経過時間  $t$  までに異常未検出なセンサノード集合

$A$  : 隣接最大故障影響波及時間行列

$a_{ij}$  :  $i$  から  $j$  への直接最大故障影響波及時間

$B$  : 隣接最小故障影響波及時間行列

$b_{ij}$  :  $i$  から  $j$  への直接最小故障影響波及時間

$C$  : 最大故障影響波及時間行列

$c_{fs}$  :  $f$  で故障が発生してから  $s$  で異常が検出されるのに高々必要な時間

$D$  : 最小故障影響波及時間行列

$d_{fs}$  :  $f$  で故障が発生してから  $s$  で異常が検出されるのに少なくとも必要な時間

$E$  : 最大異常検出時間行列

$e_{fs}$  :  $f$  で故障が発生した場合に最初の異常検出から  $s$  で異常検出されるまでに高々必要な時間

$G$  : 最小異常検出時間行列

$g_{fs}$  :  $f$  で故障が発生した場合に最初の異常検出から  $s$  で異常検出されるまでに少なくとも必要な時間

$P$  : 隣接故障影響波及確率行列

$p_{ij}$  :  $i$  から  $j$  への直接最小故障影響波及確率

$Q$  : 故障影響波及確率行列

$q_{ij}$  :  $i$  から  $j$  への最小故障影響波及時間経路を通る累積故障影響波及確率

## 略号

CCD(Cause Consequence Diagram) : 原因結果関連図

CC T(Cause Consequence Tree) : 原因結果関連樹木

FPS(Failure Propagation Prediction and Source Detection System) : 故障波及予測・診断システム

SDG(Signed Directed Graph) : 符号付有向グラフ

# 第 1 章 序論

## 1. 1 本研究の目的

近年、システムの複雑化、大規模化によりシステムの信頼性が低下し、故障発生に伴う機能喪失による社会的影響が増大している。このため、システム高信頼化技術の必要性が高まっている。システム高信頼化のアプローチには、故障発生の防止と機器故障時の影響最小化がある。故障発生の防止は、機器固有信頼度の向上、すなわち常用系ハードウェアの高信頼化と予防保全、すなわち定期的保守による高信頼度の確保により達成される。故障影響の最小化は事後保全、すなわち異常個所の早期発見と迅速な修理による高信頼度の確保と多重化、バックアップなどのシステム構成高信頼化による運転継続性の確保により達成される。

原子力プラントや化学プラントのような大規模システムでは、万一、事故、災害が発生すれば、その影響が重大かつ多方面にわたる恐れがあることから、特にその安全性、信頼性の要求が高い。従来は、事故原因の物理的な分析を中心にして、材料や設計などハードウェアの改善によって安全の達成を目指した。しかし、システムの大規模化、複雑化に伴いシステム構成要素の故障発生確率が無視しえなくなった。さらに、1979年3月に発生した米国スリーマイル島原子力発電所における事故は、防災対策上、システムの異常状態を的確に把握することが極めて重要であることを印象付ける結果となった。すなわち、<sup>44)</sup>事故発生後1分間に100を越す警告灯がつき、何が重要なのかを見落とす事態が起きた。その結果、故障は起こるという前提に立ち、万一故障が発生してもその影響を最小化するアプローチの重要性が認識されるようになった。

システム異常時の運転員の役割は、次に示すものである。

- (1) 異常が発生したという判断
- (2) 異常の発生原因が何であるかという判断
- (3) 異常がどのような経路で波及していくのかという判断
- (4) 異常の影響拡大防止

しかし、異常時において処理を必要とする情報は量と複雑さにおいて人の処理能力の限界を越え、運転員の迅速で確実な対応を困難にしている。

本研究では、大規模システムにおける異常検出時に上記(2)、(3)のための運転員支援を行なうことを目的として、故障原因推定と故障影響波及範囲予測に関する問題について検討する。

原子力プラントにおいては、故障原因推定と故障影響波及範囲予測を含めて外乱解析(Disturbance Analysis)と呼ぶ。

外乱解析は、プラントの内部で発生した外乱(たとえば、ある場所の温度または圧力が突然あるいは徐々に変化する現象)をいち早く検知し、外乱の発生原因が何で、どのよ

うに波及していくかを解析してプラントの総合的診断を行うために開発された手法で、運転監視システムと密接な関係を持っている。従来、原子力プラントの異常監視として炉雑音解析や異常反応度推定など多数のシステムが開発され多くの成果をあげているが、外乱解析および監視は、それらの局所的検出法と異なり、むしろプラントの全体の状態を総合的に判断しようとするものである。<sup>1)</sup>

システムの故障は状態量を検出し、その変化を捕捉することによって原理的には検出可能である。しかし、システムが大規模になると状態量が増加し、そのすべてを測定することは容易ではない。また、対象の複雑さからくる定式化の困難さや多数の方程式を扱うことを考えると物理方程式を解くことによって故障原因の推定およびその波及予測を実時間で実施することは困難である。そこで、故障の因果関係を簡単な論理モデルで記述することによって高速な演算を可能にするアプローチをとる。

## 1. 2 従来の研究

従来の主なモデルには、西ドイツのGRS (Gesellschaft für Reaktorsicherheit) とノルウェーのHaldenプロジェクトが共同で開発した外乱解析システムSTAR (Störung Analyse Rechner)<sup>2)</sup>で使用しているCCD (Cause Consequence Diagram) と米国電力研究所 (EPRI) の外乱解析システムEPRI-DAS (Electric Power Institute - Disturbance Analysis System)<sup>3)</sup>で使用しているCCT (Cause Consequence Tree) がある。

また、国内ではCCD、CCTに代わる論理モデルとして、伊理他の符号付有向グラフ<sup>4)</sup>や古河他の故障波及モデル<sup>5)</sup>などが提案されている。

従来の主なモデルとして、CCD、CCT、符号付有向グラフ、故障波及モデルの概要について以下では紹介する。

### 1. 2. 1 CCD

CCDは異常事象と論理演算子をノードとする論理回路網である。

低圧給水加熱器 (図1. 1) のCCDモデルを図1. 2に示す。いま仮に低圧給水加熱器のドレインポンプのスイッチが断または同ポンプが修理中 (Event 3) であり、そのとき加熱器内の伝熱管が破損して加熱器の水位が徐々に上昇していたとする。同低圧給水加熱器の伝熱管破断に関するセンサはないので、この水位上昇は第1制限値を越えた時点で初めて発見 (Event 8) される。ここで外乱解析プログラムは、第1原因が低圧給水加熱器の伝熱管破損と決定 (Event 4) できる。この時点で適当な修正動作を施せない場合、第2制限値を越えた時点で該当低圧給水加熱器は自動的に切りはなされるが、この切りはなしがうまくいったかどうかの信号は、直接中央計算機に取り込まれておらず、運転員に尋ねることが必要で、運転員は回答用の特殊キーボードでYESまたはNOと答える。加熱器のバイパスがうまく行かない場合、水位はさらに上昇し、第3制限値で2台の主復水ポンプが停止し、補助復水ポンプが起動される。主復水ポンプの停止は脱気器の水位低下<sup>1,2)</sup>→主給水ポンプトリップに至る。

このようにSTARシステムはCCDにより異常を検出し、その第1原因が何であり、またどのように波及していくかをいち早く運転員に知らせると同時に、運転員と対話をしてながら情報の不足を補っている。

しかし、CCDはモデル開発時の計算機の演算能力に制限があったためにイベント間の時間遅れは対象としていない。



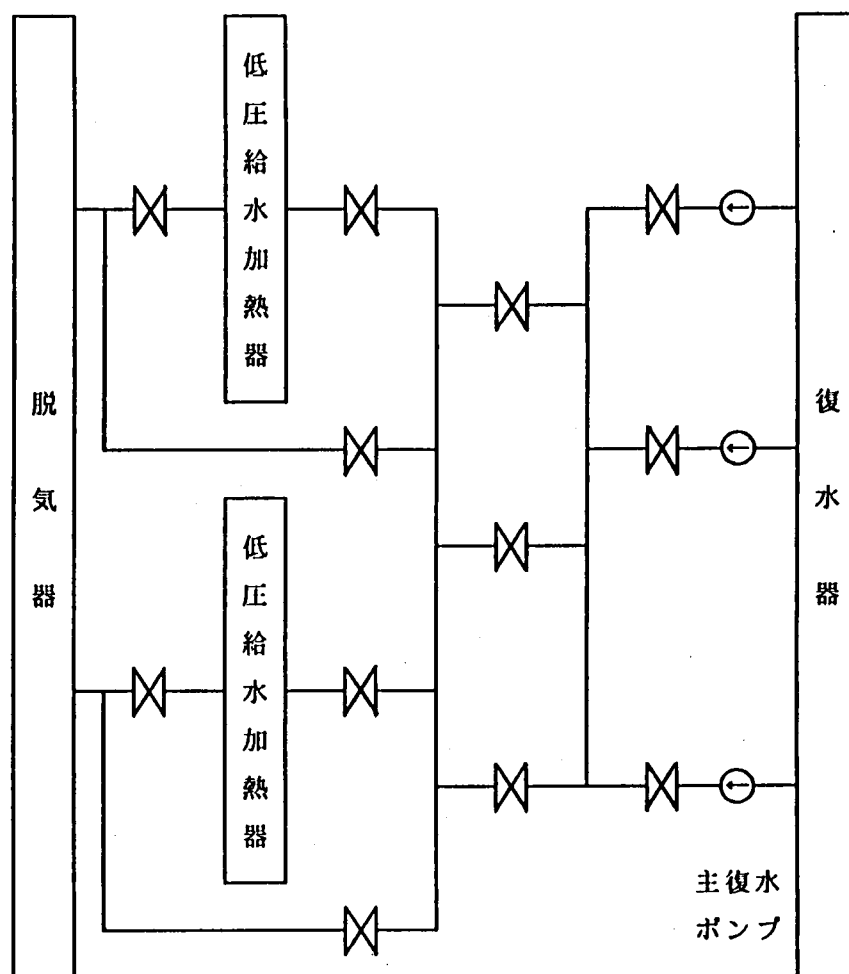


図 1. 1 低压给水加热器系統図<sup>1)</sup>

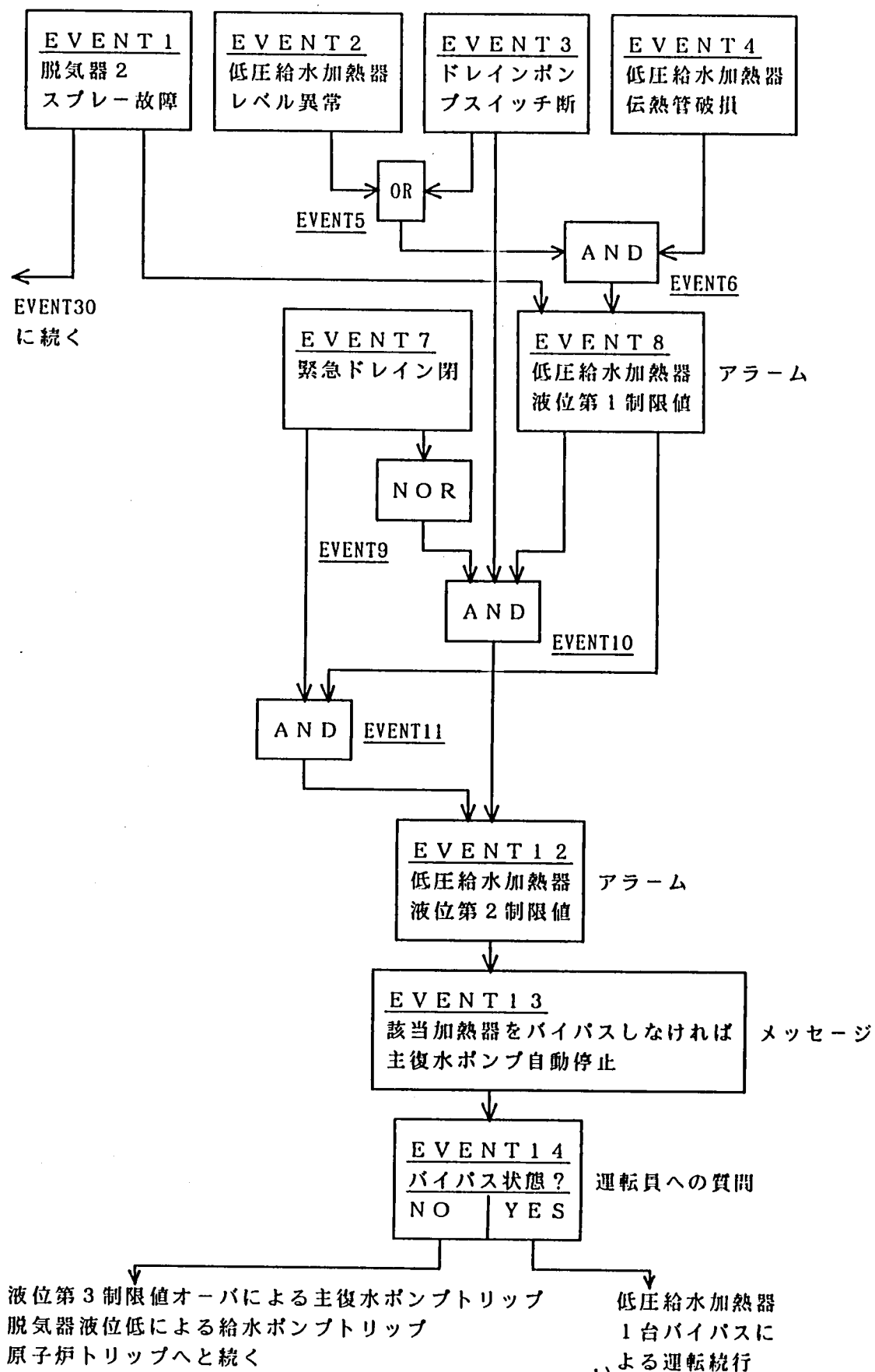


図 1. 2 低圧給水加熱器の CCD<sup>1)</sup>

## 1. 2. 2 CCT

CCTは異常事象と論理演算子をノードとするフォルトツリーモデル<sup>6)</sup>に遅れ時間要素を含めたものである。

給水制御系（図1. 3）のCCTモデルの一部を図1. 4に示す。図1. 4は、給水制御系で定格運転中にレベル計LT112が故障を起こし、実際のレベルより高い値を示したとすれば、3要素制御系は直ちにこの情報を受けて流調弁を閉じ、この結果蒸気発生器の液位が低下することを示す。レベル計LT111およびLT112の不一致およびLT112のレベル高の信号で、15秒後に給水量が0になること、また蒸気流量と給水流量の不一致でさらに29秒後にSGレベルが制限値以下になること、自動制御のモードを自動より手動に切り替え、レベル計LT111で水位を保つように運転員に指示することによりプラントトリップを避けることができる。<sup>1,3)</sup>

しかし、CCTは故障の因果関係をツリー状に展開しているため、共通原因故障のように本来ネットワーク状になる因果関係もツリー状に展開しているところに記述能力の限界がある。

## 1. 2. 3 符号付有向グラフ

符号付有向グラフのノードは状態変数に対応し、その有向枝は変数間の直接の因果関係を表す。さらに因果関係を助長と抑制に分類し、それぞれ有向枝に+と-の符号を与える。

給水タンクシステム（図1. 5）の符号付有向グラフを図1. 6に示す。有向枝の符号+（-）は始端ノードによって表される状態変数値が正常値より大きい場合、終端ノードによって表される状態変数値が正常値より大きく（小さく）なる関係を示している。<sup>4)</sup>

しかし、符号付有向グラフは故障原因推定のために開発されたものであり、モデル自身では時間遅れを扱えないため、故障影響の波及を予測するためには、システム全体のノードについて一定時間ごとの状態を記憶する必要がある。<sup>7)</sup>

## 1. 2. 4 故障波及モデル

故障波及モデルは、予防保全設計支援を目的として開発されたものであり、異常事象をノード、ノード間の関係を故障影響波及方向、波及時間（遅延時間）、波及確率で定義したネットワークモデルである。ポンプシステム（図1. 7）の故障波及モデルを図1. 8に示す。電源で故障が発生した場合の故障影響波及過程は図1. 9のように図示される。故障波及モデルは故障影響波及過程だけでなく、故障影響波及に伴う危険度評価や機能生存経路探索<sup>5,8)</sup>を行なえる点に特徴があり、液化石油ガスプラント等の安全性解析<sup>9,10)</sup>に適用された。

しかし、故障波及モデルは異常事象の因果関係をOR論理に限定しているため、記述能力に限界がある。また、予防保全設計支援を目的として開発されたものであるため、外乱解析システムに適用するためには故障原因推定法の開発や故障影響波及過程演算の高速化等の課題がある。

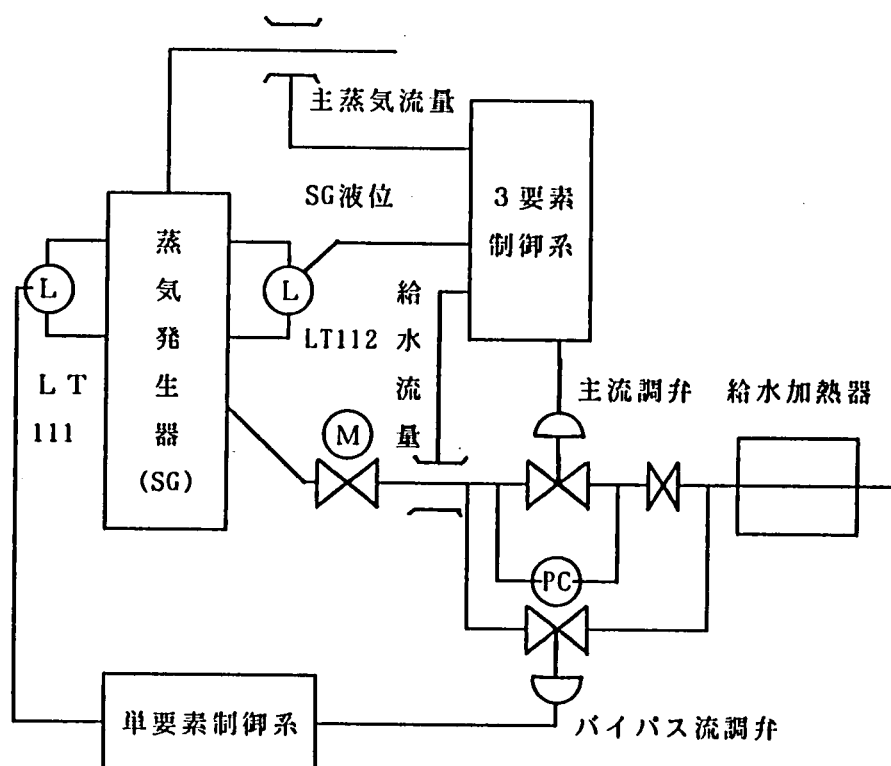


図 1. 3 給水制御系<sup>1)</sup>



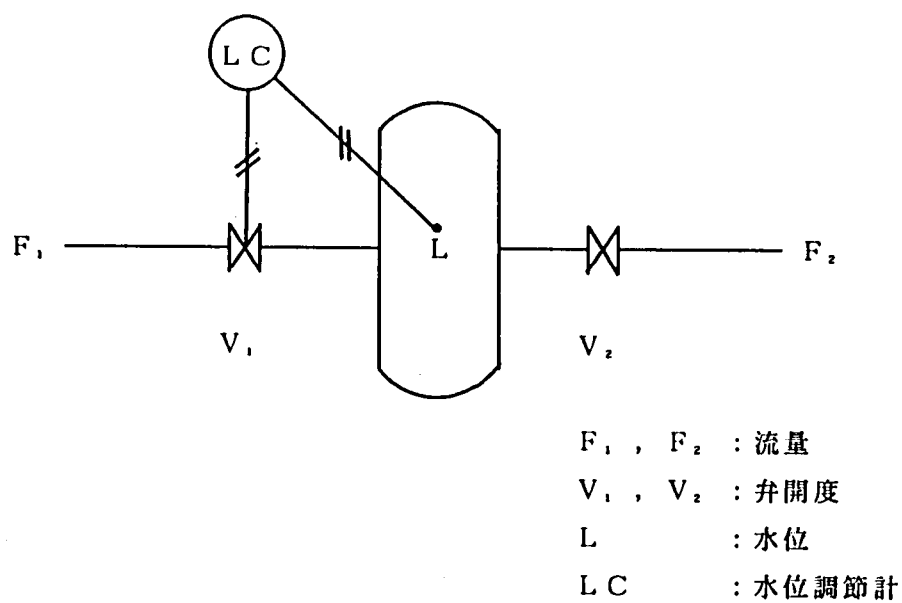


図 1. 5 給水タンクシステム<sup>4)</sup>

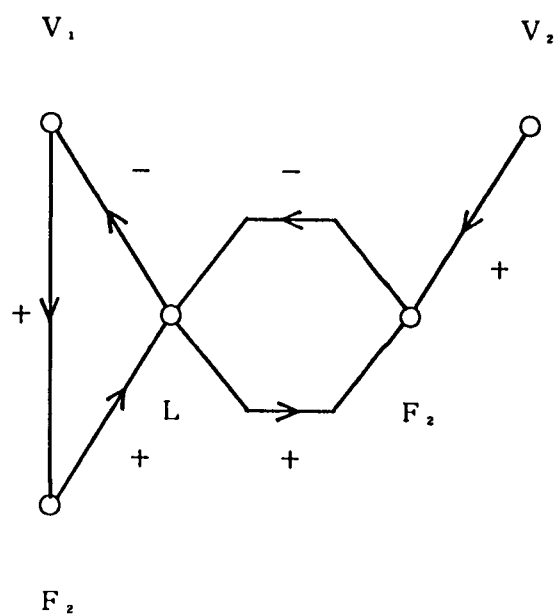


図 1. 6 給水タンクシステムの符号付有向グラフ<sup>4)</sup>

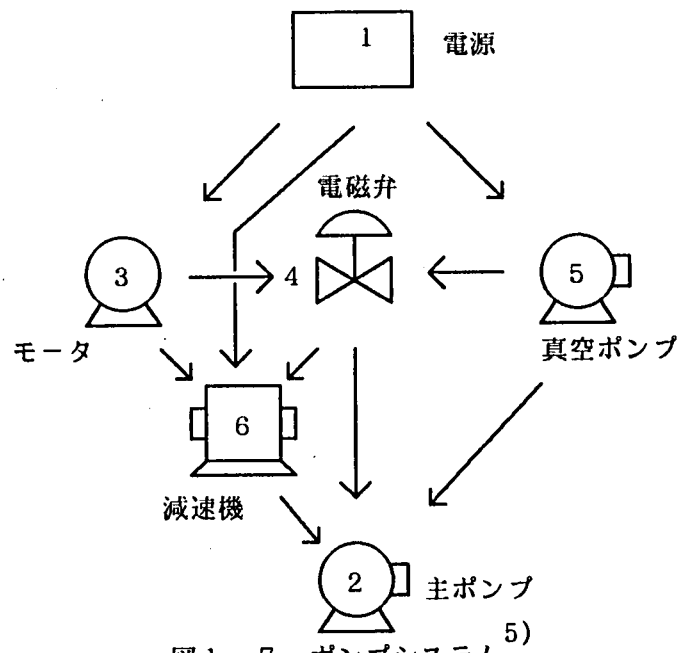


図 1. 7 ポンプシステム<sup>5)</sup>

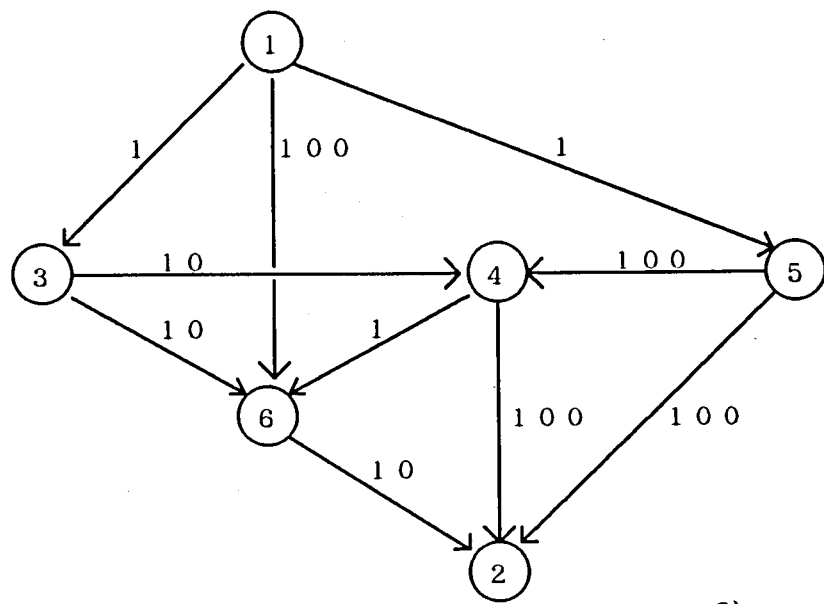
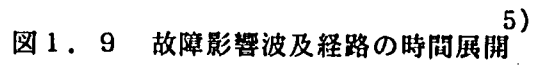


図 1. 8 ポンプシステムの故障波及モデル<sup>5)</sup>





## 1. 3 本論文の概要

本研究は、大規模システムにおける異常検出時の運転員支援を目的とする故障影響波及範囲予測と故障原因推定に関する問題を対象とする。

従来モデルより問題記述能力の高いネットワークモデル（故障影響波及モデル）を提案し、故障影響波及範囲予測法および故障原因推定法の開発を行い、原子力発電支援システムへの適用及び予防保全設計への適用により提案方法の有効性を確認した。

第2章では故障影響波及範囲予測法について述べる。<sup>11-14)</sup>従来の故障影響波及範囲予測法は、故障の因果関係を定性的にとらえ、次に生起する事象を予測することに主眼があった。そのため、故障影響の波及範囲とその時間的变化を定量的にとらえにくいという問題があった。そこで、故障影響波及過程を定量的にとらえられる故障影響波及範囲予測法を提案する。最初に、故障影響波及の時間遅れと故障形態間の論理関係（AND, OR）の両方を表現できるという従来モデルより記述能力の高いモデルを提案する。提案モデルは、ノードにシステム構成機器の故障形態（以下、故障要素と呼ぶ）を対応させ、リンクに隣接故障要素間の故障影響波及関係を波及方向と波及時間を与えることで対応させたネットワークである。さらに、各ノードにAND, ORの区別を与えることで論理関係を記述する。故障影響波及範囲予測法は、故障原因要素とその故障発生時刻が与えられたとき、提案モデルを用いてある時刻までに故障の影響を受ける故障要素を求めるものである。本方法は、AND, OR論理関係を原因（入力）側と結果（出力）側に故障の影響が波及した時刻を用いて定式化し、故障原因要素から故障の影響を受ける時刻が早い順に故障要素を求めるという考え方を基本とするものであり、最短距離を求めるDijkstra法<sup>31)</sup>を拡張している。

第3章では故障原因推定法について述べる。<sup>15-17, 21, 22, 28, 29)</sup>複雑な故障影響波及関係を記述する能力に優れている時間・確率付有向グラフに基づく故障原因推定法を提案する。この方法は、故障影響波及時間を利用して故障原因候補を絞り、機器の故障率と故障影響波及確率を用いて故障原因である可能性の順序付けを行うという特長を持つ。これは、プラントでは同じ故障原因でもそれを診断する時間の差異によって異なるセンサ情報を得る場合があることを積極的に利用するものである。

また、大規模システムにおける故障の因果関係の論理モデルにもとづく故障原因推定法は従来から研究されているが、ほとんどの方法はセンサからの情報は正しいと仮定している。しかし、現実にはシステム構成機器の故障と同程度にセンサ故障が発生する場合もあるので、この仮定は必ずしも成立しない。そこで上述の提案方法をセンサ故障を含む場合も扱えるように拡張する。センサには、異常が発生していないにもかかわらず警報を発する誤作動故障と、異常が発生しても警報を発しない不作動故障の二つの故障モードがある。誤作動故障は故障の因果関係の論理モデルの一構成要素として扱えるようにすれば、上述の方法がそのまま適用できることを示す。このアプローチは誤作動故障のために特別な処理をする必要がないこと、すなわち機器故障とセンサ誤作動故障が同一レベルで統一的に扱えることが特長である。不作動故障については、推定された故障原因から異常を検出し

たセンサまでの故障影響波及時間と正常状態を示しているセンサまでの波及時間とを比較し、矛盾がある場合に正常状態を示しているセンサを不作動故障であると推定することで処理する。このアプローチは、モデルの論理的因果関係だけでなく、故障影響波及時間という定量的関係も利用して推定している点に特長がある。

さらに、故障原因推定法の実用化における次の二つの課題を解決するためにセンサ出力パターン照合形故障原因推定法を提案する。第一は故障影響波及時間の誤差の問題である。すなわち、モデルに与えた波及時間と実際の波及時間が異なる場合には推定結果を誤る可能性がある。そこで、波及時間に最大値と最小値を与え、生成するセンサ出力パターンに不確定部分を認めることで解決する。第二はセンサ故障仮定基準の問題である。上述の故障原因推定法においては矛盾が生じた場合にセンサ不作動故障を仮定するが、何個までの不作動故障を認めるかに明確な基準がない。そこで、推定故障原因の故障確率とセンサ故障発生率をセンサ故障の評価尺度に導入することで解決する。

第4章では原子力発電支援システムへの適用について述べる。<sup>23,24,27)</sup>昭和54年3月に発生した米国スリーマイルズ島原子力発電所における原子炉事故を契機として、非常時の運転員の判断を支援することに重点をおいた通商産業省補助事業原子力発電支援システム開発が開始された。本研究の提案手法を開発システム（インストラクションシステム）<sup>38)</sup>に適用した。故障波及予測・診断システムは、異常を検出すると故障影響波及範囲予測法（第2章）によって予測された一定時間後に故障の影響が波及する範囲と故障原因推定法（第3章）によって推定された故障原因候補をCRT画面のシステム系統図上に示すことにより運転員を支援する。故障波及予測・診断システムをインストラクションシステムにおける事故時の診断予測機能を担当するサブシステムの一つとして位置付け、他系統による代行が困難であり、かつ故障発生から原子炉トリップまでに適切な処置を施すことが可能な冷却材再循環系、給・復水系を対象として開発した。プラントシミュレータによる検証試験の結果、本システムの有効性が確認された。

第5章では予防保全設計への適用について述べる。<sup>18-20,26,28,29)</sup>故障影響波及範囲予測法により、ある故障が発生した場合、対策を施さなければ、何時間後にどの範囲までその影響が広がるかを予測する。この結果から、短時間に広い範囲に故障の影響が波及する機器は、より高い信頼性を持つ機器に交換する、重要な系統へ波及する場合には保護装置やバイパスを設置する、極めて短時間に波及する系統は自動切替にするなど、予防保全設計が可能となる。故障原因推定法により、プラントで何らかの異常が発生し、中央操作室のメータ、表示器、警報灯類が作動した場合に、真の故障原因を同定できるか否か、ひいては迅速・適切な対策を施せるか否かを設計時に確認できる。適用例としては、大規模プラントの1つである脱石油エネルギープラントを取り上げ、プラントの安全性を評価する。さらに、診断システムの検証評価法の一つとして、ある故障要素が故障原因である場合に予想されるセンサ出力パターンと他の故障要素が故障原因である場合のセンサ出力パターンとが一致するかどうかを調べることにより、故障原因推定を行った場合に故障原因候補数を何個まで絞ることができるかを評価する診断精度事前評価法を提案する。

## 第2章 故障影響波及範囲予測法

### 2. 1 緒言

プラントで故障（異常）が検知された場合、運転員は故障の影響の拡大防止対策を要求される。適切な対策を行うためには、故障原因の同定および影響の波及予測が必要であるが、化学プラント、原子力プラントなどの大規模プラントにおいては運転員が短時間で同定・予測を行うことは困難である。そこで近年、公共機関、民間企業などで国内外にわたり

大規模プラント運転員支援システムの開発が積極的に進められている。<sup>1)</sup>

大規模プラントでは、故障原因の同定および影響の波及予測を物理方程式を解くことによって短時間で行うことは不可能である。これは、対象の複雑さからくる定式化の困難さと多数の方程式を解くための演算時間に問題があることによる。そこで、故障の因果関係を簡単なモデルで記述することによって高速な演算を可能にする方法が従来から提案されている。

従来の主なモデルには、原因結果関連樹木<sup>3)</sup>（CCT）や原因結果関連図<sup>2)</sup>（CCD）、符号付有向グラフ<sup>4,7)</sup>（SDG）がある。CCTによる方法は、故障の因果関係をツリー状に展開しているため、演算速度は最も速い。しかし、共通原因故障のように本来ネットワーク状になる因果関係もツリー状に展開しているところに記述能力の限界がある。CCDによる方法は、故障の因果関係を論理回路で記述するものであり、運転員との対話により解析が進行する点に特徴がある。しかし、故障影響の波及現象を取扱う場合の重要な因子である時間遅れを扱えない。SDGは状態変数の因果関係をグラフ表示したもので、状態変数をノードに対応させ、2変数間の直接の因果関係を符号付きの有向枝で表すため対象の構成をとらえやすい。しかし、このモデル自身では時間遅れを扱えないため、故障影響の波及時刻を予測するためには、システム全体のノードについて一定時間ごとの状態を記憶する必要がある。

本章では、故障の因果関係と影響波及の時間遅れをネットワークで記述する故障影響波及網を提案し、このモデルにおける故障影響波及範囲予測法を示す。提案方法は、故障の因果関係をネットワークで記述するためCCTを用いた方法よりも演算時間を要するが、問題記述能力が高く、CCDやSDGでは扱えない時間遅れを扱えるという点が特徴といえる。

以下、2. 2節では故障影響波及モデルを、2. 3節では故障影響波及範囲予測法を示す。

## 2. 2 大規模システムにおける 故障影響波及過程の ネットワークモデル化

システム構成機器の故障形態（たとえば、ポンプ停止、配管つまり）を故障要素と呼び、隣接2故障要素間の故障影響波及関係を波及方向と波及時間（遅延時間）で定義すると、故障影響波及関係はネットワークモデル化できる。ただし、一つの機器に複数個の故障形態がある場合は、それぞれ別の故障要素として扱う。以下では、このモデルを故障影響波及網と呼ぶ。

### 2. 2. 1 AND故障要素とOR故障要素

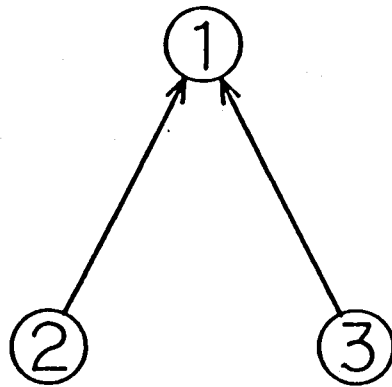
故障影響波及網においてAND、OR論理関係を導入するためにCCD、CCTのように論理演算子を導入すると、ネットワークのノード数が倍増するため、論理演算子の役割を故障要素に割当てた。すなわち、隣接する故障要素のうち少なくとも一つの故障要素から故障の影響を受けた場合に、その影響が先の故障要素へ波及する故障要素をOR故障要素と呼ぶ。そして、故障の影響を直接に受ける故障要素のすべてから故障の影響を受けた場合に、その影響が先の故障要素へ波及するものをAND故障要素と呼ぶ。図2. 1 (a)の故障要素①がOR故障要素の例、(b)の故障要素④がAND故障要素の例である。

AND、OR故障要素の区別をすべての故障要素に与えることにより、故障影響波及網上での論理関係を記述する。

### 2. 2. 2 ダミー要素

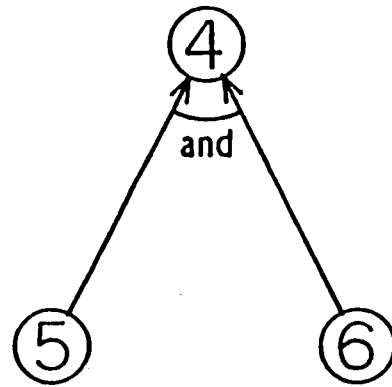
前項で述べたAND、ORは本来故障要素間の関係であり、故障要素そのものではない。したがって、AND故障要素とOR故障要素だけでは記述できない場合がある。例えば、故障要素①、②両方または②、③両方に故障の影響が波及した場合に、故障要素④に波及する例【図2. 2 (a)】について考える。これは、故障要素①と③が④に対してOR関係にあり、故障要素②の成立が条件として必要な場合と考えることもできる。このような場合、故障要素④はAND故障要素やOR故障要素では定義できない。そこで、このような場合にはAND結合関係一つについて一つのダミー要素を作り、これをAND故障要素とし、ダミー要素からの波及先の故障要素はOR故障要素とみなすことにする【図2. 2 (b)】。ただし、ダミー要素から波及先の要素への波及時間は0とする。

(a)



- ① : ポンプ停止
- ② : ポンプ故障
- ③ : 電源故障

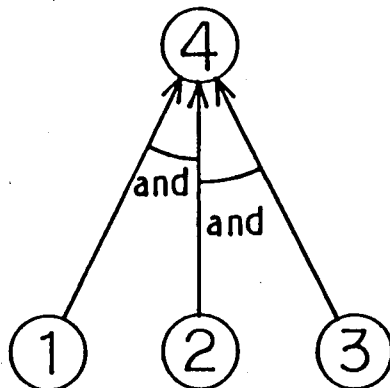
(b)



- ④ : タンク水位低
- ⑤ : 主ポンプ停止
- ⑥ : 補助ポンプ停止

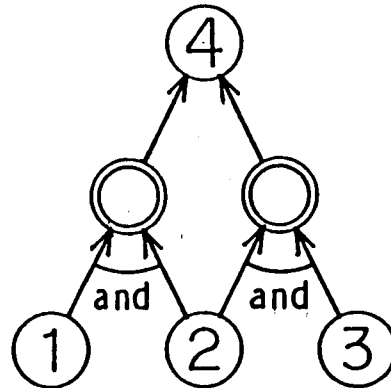
図 2. 1 AND故障要素とOR故障要素

(a)



- ① : モータコイル断線
- ② : モータスイッチON
- ③ : モータ軸固着
- ④ : ポンプ不作動

(b)



- : 故障要素
- ◎ : ダミー要素

図 2. 2 故障要素とダミー要素

## 2. 3 故障影響波及範囲予測法の提案

前節で定義した故障影響波及モデルにおいて、故障影響の波及範囲を予測する方法について述べる。本方法は、故障原因要素とその故障発生時刻が与えられたとき、ある時刻までに故障の影響が波及する故障要素を求めるものである。AND、OR論理関係を原因（入力）側と結果（出力）側に故障の影響が波及した時刻を用いて定式化し、複数の故障発生個所（故障原因要素）の間にはダミーの結合関係を付加し、見かけ上単一の故障発生個所のように扱えるようにした。このことにより、計算効率の良いDijkstra法<sup>31)</sup>（付録参照）を拡張するだけで、故障影響波及範囲の予測が可能になった。なお、故障要素が弁の開、閉などのように、それ自身は故障原因ではなく単なる条件である場合にも、その条件が成立する場合には、故障原因要素として扱う。

### 2. 3. 1 前提条件

＜前提条件 1＞ 故障要素のとり得る状態は異常（あるいは条件成立）又は正常（あるいは条件不成立）のいずれかである。

＜前提条件 2＞ 異常状態にある故障要素は正常状態には戻らない。

故障要素の状態は正常、異常の2値であるという＜前提条件 1＞は、故障の因果関係に基づくモデルでは自然な仮定である。＜前提条件 2＞は一時的な異常や間欠故障も異常状態に固定して扱うことを意味する。現実には間欠故障も発生するが、故障影響の波及予測を行う立場からは最悪の場合の予測、すなわち安全側の評価になる。

### 2. 3. 2 アルゴリズム

AND故障要素とOR故障要素の故障影響波及時刻は、故障要素jからiへの直接故障影響波及時間 $a_{ji}$ と故障要素jの故障影響波及時刻 $h_j$ を用いて次のように定式化できる。

(1) AND故障要素iの故障影響波及時刻 $h_i$

$$h_i = \max_{j \in R_i} \{ h_j + a_{ji} \} \quad (2.1)$$

(2) OR故障要素iの故障影響波及時刻 $h_i$

$$h_i = \min_{j \in R_i} \{ h_j + a_{ji} \} \quad (2.2)$$

ただし、

$$R_i^{\Delta} = \{j \in V \mid a_{ji} < \infty\} \quad (2.3)$$

ここで、 $V$ は故障要素すべての集合である。 $a_{ji}$ が $\infty$ の場合は故障要素 $j$ から $i$ への直接故障影響波及関係がないことを意味する。すなわち、 $R_i$ は故障要素 $i$ に直接に故障の影響を及ぼす故障要素の集合を表わす。

また、前項の前提条件から、一度故障の影響を受けた故障要素は、異常状態に固定して扱える。したがって、故障影響の波及予測では故障要素が故障原因要素から最初に影響を受ける時刻を求めればよい。次に示すアルゴリズムは、故障原因要素から故障の影響を受ける時刻が早い順に故障要素を求めるという考え方を基本とするものである。AND故障要素は、直接影響を与えるすべての故障要素の波及予測時刻が決まると、(2.1)式から波及予測時刻が求まる。OR故障要素は、(2.2)式より故障原因要素からの最短故障影響波及時間を求めると波及予測時刻が求まる。

故障原因要素集合を $F$  ( $\subset V$ )、故障原因要素を $f$  ( $\in F$ )、その故障発生時刻を $t_f$ 、故障要素 $j$ の故障影響波及予測時刻を $h_j$ とする。以下の手順で、時刻 $t_L$ までに故障影響の波及する故障要素を求める。

<ステップ1> 故障原因要素 $f$ への入力枝削除

$\forall f \in F$ について、

$$a_{if} = \infty \quad (j \neq f, j \in V) \quad (2.4)$$

<ステップ2> 基準故障原因要素の設定

$$\min_{f \in F} \{t_f\} = t_{f_0} \quad (2.5)$$

となる $f_0$  ( $\in F$ )を求める。

<ステップ3> 基準故障原因要素から他の故障原因要素へのダミー枝の付加

$f \in F, f \neq f_0$ について、

$$a_{f_0 f} = t_f - t_{f_0} \quad (2.6)$$

<ステップ4> 初期化と故障影響未波及要素集合Uの設定

$$h_j = \infty \quad (j \in V, j \neq f_0) \quad (2.7)$$

$$h_{f_0} = t_{f_0} \quad (2.8)$$

$$i = f_0 \quad (2.9)$$

$$U = V - \{f_0\} \quad (2.10)$$

<ステップ5> 故障影響未波及要素の暫定故障影響波及予測時刻の更新

$j \in U$  ( $a_{ij} < \infty$ ) について、

(i)  $j$  がOR故障要素である場合

$$h_j > h_i + a_{ij} \text{ ならば、}$$

$$h_j = h_i + a_{ij} \quad (2.11)$$

とする。そうでなければ、 $h_j$  はそのまま。

(ii)  $j$  がAND故障要素である場合

$$R_j \cap U = \emptyset \text{ ならば、}$$

$$h_j = \max_{k \in R_j} \{h_k + a_{kj}\} \quad (2.12)$$

とする。そうでなければ、 $h_j$  はそのまま。



＜ステップ6＞ 故障影響波及要素の選定

$$\min_{j \in U} \{ h_j \} = h_{j_0} \quad (2.13)$$

となる  $j_0$  ( $\in U$ ) を求める。

＜ステップ7＞ 終了判定（故障影響波及予測時刻のチェック）

$$h_{j_0} > t_L$$

ならば、終了する。

＜ステップ8＞ 故障影響未波及要素集合の更新

$U$  から  $j_0$  を除去する。

＜ステップ9＞ 終了判定（故障影響未波及要素集合のチェック）

$$U = \phi$$

ならば終了する。

$$U \neq \phi$$

ならば、

$$i = j_0$$

とにおいて、＜ステップ5＞へ戻る。

＜ステップ1＞では以下のことを行っている。故障原因要素が複数個あり、かつ故障原因要素間に波及関係があると、他の故障原因要素から影響を受ける故障原因要素では、計算によって求まる故障影響波及予測時刻と故障発生時刻が一致しない場合がある。そこで、故障原因要素の入力枝を削除することにより、故障発生時刻の値を優先することにする。この理由は、故障影響波及時間よりも故障発生時刻の値のほうがデータ精度が高いと考えるためである。

＜ステップ2、3＞では、基準故障原因要素を設定し、他の故障原因要素は故障原因ではない要素と同じ扱いができるようにダミー枝を付加している。そのため、本アルゴリズムでは故障原因が複数個存在する場合にも、見かけ上単一故障原因と同じ手順で実行できる。

＜ステップ4～9＞は、＜ステップ5＞（ii）、＜ステップ7＞を除けばDijkstra法と

同じである。＜ステップ5＞（ii）はAND故障要素に影響を直接与えるすべての故障要素の故障影響波及予測時刻が決まれば、AND故障要素の波及予測時刻が確定することによる。＜ステップ7＞で終了すれば、故障影響未波及要素集合に含まれない要素が、時刻 $t_L$ までに故障の影響が波及する故障要素である。＜ステップ9＞で終了すれば、すべての要素に故障の影響が波及することになる。

なお、本モデルは故障影響波及現象としてのフィードバックループは扱えないことに注意する必要がある。フィードバック現象を扱うためには、2回目以降に故障の影響を受ける時刻も求める必要があるが、フィードバックループを含む故障波及網に本アルゴリズムを適用した場合には、最初に故障の影響を受ける時刻だけが求まる。アルゴリズムを拡張し、2回目以降に影響を受ける時刻も求まるようにすることは可能である。しかし、影響の程度や正負を扱わない2値（正常、異常）モデル上で2回目以降の時刻を求めることはあまり意味がない。

### 2. 3. 3 計算例

簡単な例を用いて、前節で示した故障影響波及範囲予測法について説明する。故障影響波及関係が図2. 3に示すネットワークでモデル化された場合を考える。故障要素①、②、③、④、⑦がOR故障要素であり、故障要素⑤、⑥がAND故障要素である。

以下では故障要素①、⑦が故障原因であり、その故障発生時刻 $t_1 = 20$ 、 $t_7 = 10$ である場合に、時刻 $t_L = 120$ までに故障の影響を受ける故障要素を求める。なお、故障要素⑦を故障要素①から⑥への故障影響波及の条件を表わす要素と解釈することもできる。そのとき、 $t_7$ は条件成立時刻を意味する。

＜ステップ1＞では、故障原因要素①、⑦に入力枝がないので除去される枝はない。＜ステップ2＞では基準故障原因要素は⑦になる。＜ステップ3＞の結果、図2. 3のネットワークに有向枝⑦-①を付加する。このとき、

$$a_{7,1} = t_1 - t_7 = 10$$

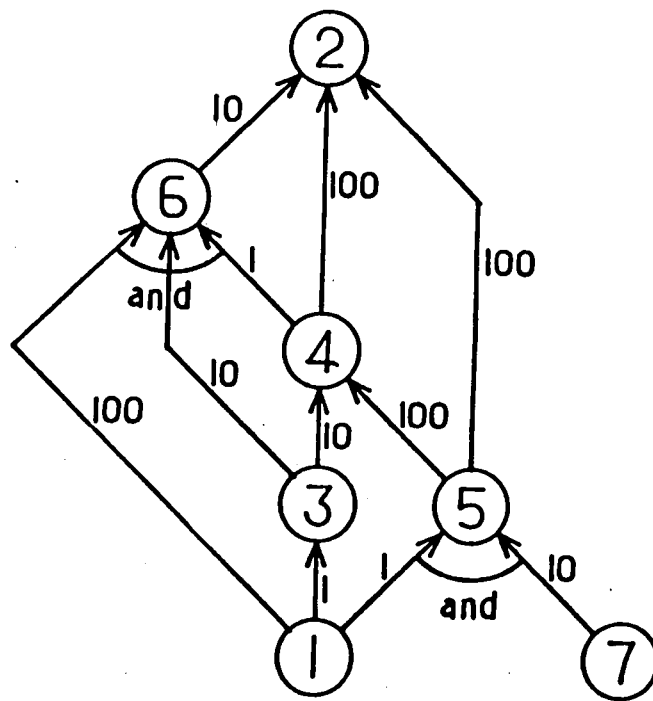
とする。＜ステップ4＞の結果、次のような初期値設定を行なう。

$$h_j = \infty \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

$$h_7 = 10$$

$$i = 7$$

$$U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$



○ : 故障要素  
 $\xrightarrow{t}$  : 波及方向と時間

図 2. 3 故障波及網

故障要素⑦からは故障要素①、⑤に波及する。故障要素①はO R故障要素であるから、  
 <ステップ5> (i) より、

$$h_1 = h_7 + a_{7,1} = 20$$

となる。故障要素⑥はA N D故障要素であるから、<ステップ5> (ii) より

$$R_5 = \{1, 7\}$$

$$R_5 \cap U \neq \phi$$

したがって、 $e_5$ はそのまま。<ステップ6>では、

$$\min_{j \in U} \{h_j\} = h_1$$

となる。 $h_1 < t_L$  であるから、<ステップ7>では終了しない。<ステップ8>において、集合Uから故障要素①を除去する。この結果、

$$U = \{2, 3, 4, 5, 6\}$$

となる。<ステップ9>において、 $U \neq \phi$ であるから、 $i = 1$ において、<ステップ5>へ戻る。以下、各手順の結果だけを示す。

$$\text{<ステップ5> (i)} \quad h_5 = h_1 + a_{1,5} = 21$$

$$\text{<ステップ5> (ii)} \quad h_6 = \max \{h_1 + a_{1,6}, h_7 + a_{7,6}\} = 21$$

$$\text{<ステップ5> (ii)} \quad R_6 = \{1, 3, 4\}$$

$$R_6 \cap U \neq \phi$$

したがって、 $h_6$ はそのまま。

$$\text{<ステップ6>} \quad \min_{j \in U} \{h_j\} = h_3$$

$$\text{<ステップ7>} \quad h_3 < t_g \quad L$$

<ステップ8>  $U = \{2, 4, 5, 6\}$

<ステップ9>  $i = 3$

<ステップ5> (i)  $h_4 = h_3 + a_{3,4} = 3 \ 1$

<ステップ5> (ii)  $R_3 = \{1, 3, 4\}$

$$R_3 \cap U \neq \phi$$

したがって、 $h_3$ はそのまま。

<ステップ6>  $\min_{j \in U} \{h_j\} = h_3$

<ステップ7>  $h_3 < t_L$

<ステップ8>  $U = \{2, 4, 6\}$

<ステップ9>  $i = 5$

<ステップ5> (i)  $h_2 = h_5 + a_{5,2} = 1 \ 2 \ 1$

<ステップ5> (i)  $h_4 = 3 \ 1 < h_5 + a_{5,4} = 1 \ 2 \ 1$

したがって、 $h_4$ はそのまま。

<ステップ6>  $\min_{j \in U} \{h_j\} = h_4$

<ステップ7>  $h_4 < t_L$

<ステップ8>  $U = \{2, 6\}$

<ステップ9>  $i = 4$

<ステップ5> (i)  $h_2 = 1 \ 2 \ 1 < h_4 + a_{4,2} = 1 \ 3 \ 1$

したがって、 $h_2$ はそのまま。

$$\langle \text{ステップ5} \rangle \quad (ii) \quad h_6 = \max \{ h_1 + a_{1,6}, h_3 + a_{3,6}, h_4 + a_{4,6} \} = 120$$

$$\langle \text{ステップ6} \rangle \quad \min_{j \in U} \{ h_j \} = h_6$$

$$\langle \text{ステップ7} \rangle \quad h_6 = t_L$$

$$\langle \text{ステップ8} \rangle \quad U = \{ 2 \}$$

$$\langle \text{ステップ9} \rangle \quad i = 6$$

$$\langle \text{ステップ5} \rangle \quad (i) \quad h_2 = 121 < h_6 + a_{6,2} = 130$$

したがって、 $h_2$ はそのまま。

$$\langle \text{ステップ6} \rangle \quad \min_{j \in U} \{ h_j \} = h_2$$

$$\langle \text{ステップ7} \rangle \quad h_2 > t_L$$

したがって、終了。

この結果、集合 $U$ に属さない故障要素①、③、④、⑤、⑥、⑦が時刻 $t_L$ までに故障の影響を受ける要素となる。

## 2. 4 結 言

プラントにおける故障影響波及過程のネットワークモデルを提案し、このモデルにおける故障影響波及範囲予測法を提案した。提案モデルは、故障影響波及の時間遅れと故障形態間の論理関係（AND，OR）の両方を表現できるという従来モデルより記述能力の高いものである。さらに、ダミー要素を導入することにより、AND，OR以外の論理関係も記述できることを示した。Dijkstra法を拡張した提案手法は、故障原因要素とその故障発生時刻が与えられたとき、提案モデルを用いてある時刻までに故障の影響を受ける故障要素を求めるという故障影響波及の時間変化を定量的に予測するものである。さらに、ダミー枝を導入することにより、多重故障原因を単一故障原因と同じ手順で実行できることを示した。

## 第3章 故障原因推定法

### 3. 1 緒言

プラントの運転室で異常が報知されると、運転員は、異常の拡大を防止する一手段として故障原因の除去（対策）を要求される。しかし、プラントの異常は、異常（故障）原因そのものよりも、故障の影響が波及した先で検出されることが多い。しかも、異常を示すセンサは短時間で多数に及び、情報過多を引き起こす。この結果、運転員は短時間で故障原因を同定することが難しくなり、適切な対策を行なえないということになる。このような懸念に対処するため、本章では故障原因推定法について述べる。

故障の因果関係の論理モデルに基づく故障原因推定法は従来から研究されている。<sup>2-4)</sup>しかし、ほとんどの方法はセンサ情報は正しいと仮定している。この仮定は、プラント構成機器の故障とセンサ故障が同程度に発生するという事実<sup>32)</sup>にそぐわない。

センサ故障を扱う従来法として、故障の因果関係をツリーモデルで表現した原因結果関連樹木（CCT）を用いるアプローチがある。<sup>3)</sup>本アプローチは、故障（事故）事象を原因と結果の関係でとらえ、原因結果関連樹木（CCT）で表し、故障を示す事象を起点としてツリー上の枝を追跡する方法である。CCTアプローチでは、多重原因故障と推定し、かつそれらの原因に共通のプロセス量が関係している場合には、データ収集系の故障とみなす方法<sup>33)</sup>が提案されている。この処理はセンサ誤作動故障（異常が発生していないにもかかわらず警報が発生する故障）<sup>34)</sup>の一部を扱っているといえる。また、センサのもう一つの故障モードである不作動故障（異常が発生しても警報が発生しない故障）<sup>34)</sup>については、観測状態とモデルの論理的因果関係の矛盾から推定する。<sup>3)</sup>CCTによる方法は、構成要素の階層化が容易、高速な演算が可能という特長を持つ。しかし、故障の因果関係をツリー状に展開しているところに記述能力の問題がある。

一方、ネットワークモデルは複雑な故障影響波及関係を記述する能力に優れている。そこで、本章では、故障の因果関係と影響波及の時間遅れを時間・確率付有向グラフで表現した故障原因推定法を提案する。この方法は、故障影響波及時間を利用して故障原因候補を絞り、機器の故障率と故障影響波及確率を用いて故障原因である可能性の順序付けを行うという特長を持つ。これは、プラントでは同じ故障原因でもそれを診断する時間の差異によって異なるセンサ情報を得る場合があることを積極的に利用するものである。

さらに本方法をセンサ故障を含む場合も扱えるように拡張する。誤作動故障は故障の因果関係の論理モデルの一構成要素として扱えるようにすれば、提案方法がそのまま適用できることを示す。このアプローチは誤作動故障のために特別な処理をする必要がないこと、



すなわち機器故障とセンサ誤作動故障が同一レベルで統一的に扱えることが特長である。不作動故障については、推定された故障原因から異常を検出したセンサまでの故障影響波及時間と正常状態を示しているセンサまでの波及時間とを比較し、矛盾がある場合に正常状態を示しているセンサを不作動故障であると推定することで処理する。このアプローチは、モデルの論理的因果関係だけでなく、故障影響波及時間という定量的関係も利用して推定している点に特長がある。

さらに、故障原因推定法の実用化における次の二つの課題を解決するためにセンサ出力パターン照合形故障原因推定法を提案する。第一は故障影響波及時間の誤差の問題である。すなわち、モデルに与えた波及時間と実際の波及時間が異なる場合には推定結果を誤る可能性がある。そこで、波及時間に最大値と最小値を与え、生成するセンサ出力パターンに不確定部分を認めることで解決する。第二はセンサ故障仮定基準の問題である。上述の故障原因推定法においては矛盾が生じた場合にセンサ不作動故障を仮定するが、何個までの不作動故障を認めるかに明確な基準がない。そこで、推定故障原因の故障確率とセンサ故障発生率をセンサ故障の評価尺度に導入することで解決する。

以下、3.2節では時間・確率付有向グラフ逆方向探索による故障原因推定法について、3.3節ではセンサ故障を含む条件下での故障原因推定法について、3.4節ではセンサ出力パターン照合形故障原因推定法について述べる。

### 3. 2 時間・確率付有向グラフ 逆方向探索による 故障原因推定法の提案

本方法はプラントの構成機器の故障形態（たとえば、ポンプ停止、配管つまり）をノード（故障要素）、機器間の故障影響波及関係を有向枝として、プラントの故障波及網を有向グラフで表現し、故障原因を推定するものである。故障原因推定は、まず設置センサから得られる異常情報を用いて故障原因候補を求め、つぎにその候補を正常情報、2機器間の故障影響波及確率と各機器の故障率を用いて故障原因である可能性の順序付けを行う。

#### 3. 2. 1 モデルと前提条件

##### (1) 故障影響波及モデル

第2章の故障影響波及モデルは、プラント構成機器の故障形態（たとえば、ポンプ停止、配管つまり）をネットワークのノードに対応させ、隣接ノード間の故障影響波及関係を波及時間（遅延時間）を持つ有向枝で定義した。これらのデータは、過去の事故例、設計図などの資料や事故の動的シミュレーションなどから得ることができる。

本章では、故障影響波及関係に波及確率を導入する。波及確率には次の2つの意味がある。

第1は、タンクの爆発により付近の装置が破損する可能性があるというような本質的に確率的な波及現象をモデル化することである。

第2は、本来AND関係でモデル化できる条件付波及関係を条件が観測できない場合に条件成立の確率を波及確率として与えることである。たとえば、図3. 1 (a) に示す故障影響波及モデルにおいて、故障要素4が観測できない場合、故障要素4の故障確率を故障要素3から2への故障影響波及確率とすることにより、図3. 1 (b) に示すようなAND故障要素のないモデル化ができる。

故障影響波及確率は、後述するように故障原因である可能性の順序付けに用いる。

##### (2) 前提条件

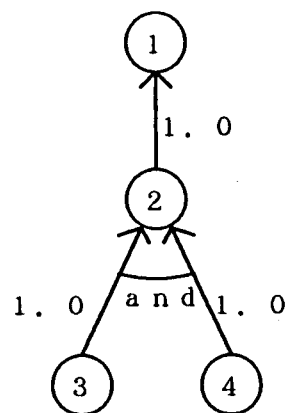
＜前提条件1＞ プラント構成機器の状態量が正常か異常かは設置したセンサによって測定可能。

＜前提条件2＞ 故障原因は一つ。

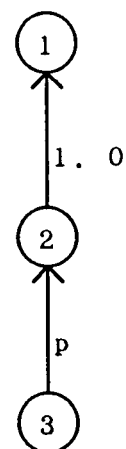
＜前提条件3＞ 各ノード（故障要素）はOR故障要素のみとする。

すなわち、複数個の有向枝が合流する故障要素から先への故障影響波及は、その故障要素へいずれか一つの有向枝からの故障影響波及があれば先へ波及するものとする。

＜前提条件1＞はセンサからの情報を利用して故障原因推定を行うには不可欠な条件であり、＜前提条件2＞は発生頻度の低い多重故障（二つ以上の故障が独立してほぼ同じに発生する故障）は扱わないという条件である。＜前提条件3＞はAND故障要素（故障の影響を直接に受ける故障要素のすべてから故障の影響を受けた場合に、その影響が先の故



(a) AND関係モデル



(b) 波及確率モデル

- ① : 配管流量小
- ② : ポンプ停止
- ③ : 電源故障
- ④ : 予備電源故障

- : 故障要素
- $\xrightarrow{p}$  : 故障影響波及方向  
と波及確率

図3. 1 故障影響波及確率とAND関係

障要素へ波及するもの)を扱わないことを意味する。この条件は以下での説明を簡単にするために設けた。3. 2. 3 項においてAND故障要素の扱い方について考察する。

### 3. 2. 2 故障原因推定手順

<ステップ0>故障原因推定のための行列演算

(1) 最小故障影響波及時間行列  $D$

隣接故障影響波及時間行列を

$$B = \{ b_{ij} \} \quad (b_{ij} : \text{ノード } i \text{ から隣接ノード } j \text{ への直接故障影響波及時間})$$

とする。行列  $B$  にFloyd法<sup>46)</sup>(付録参照)を適用すると、最小故障影響波及時間行列

$$D = \{ d_{ij} \}$$

が求まる。

(2) 最大故障影響波及時間行列  $C$

隣接故障影響波及確率行列を

$$P = \{ p_{ij} \} \quad (p_{ij} : \text{ノード } i \text{ から隣接ノード } j \text{ への直接故障影響波及確率})$$

とする。行列  $P$  において

$$p_{ij} \neq 1$$

ならば、それに対応する行列  $B$  の成分  $b_{ij}$  を  $\infty$  として、隣接最大故障波及時間行列

$$A = \{ a_{ij} \}$$

を作成する。すなわち、

$$(i) \quad p_{ij} \neq 1 \text{ ならば、} a_{ij} = \infty$$

$$(ii) \quad p_{ij} = 1 \text{ ならば、} a_{ij} = b_{ij}$$

とする。(1)と同様に、行列AにFloyd法を適用すると、最大故障影響波及時間行列

$$C = \{c_{ij}\}$$

が求まる。

時間  $d_{ij}$  は、すべての隣接故障影響波及確率を1に仮定した場合にノードiからjに故障影響が波及するのに必要な時間である。一方、時間  $c_{ij}$  は、隣接故障影響波及確率が1未満の故障影響波及経路を経由せずに、ノードiからjに故障影響が波及するのに必要な時間である。したがって、時間  $c_{ij}$  を計算する場合のほうが、時間  $d_{ij}$  を計算する場合よりも故障影響波及経路が少ないから、

$$d_{ij} \leq c_{ij}$$

が成立する。しかし、両者は極端な場合であり、現実の故障影響波及時間は  $d_{ij}$  と  $c_{ij}$  の間の値になる。したがって、時間  $d_{ij}$  は、最小故障影響波及時間を、時間  $c_{ij}$  は、最大故障影響波及時間を表すことになる。

### (3) 故障影響波及確率行列 $Q$

(1)の計算と同時に行列  $P$  を用いて、最小故障影響波及時間経路を通る累積故障影響波及確率を計算し、故障影響波及確率行列

$$Q = \{q_{ij}\}$$

を作成する。

#### <ステップ1>異常検出情報による推定

異常な状態を示すセンサに対応する故障要素kについて、kに故障影響が波及する故障要素の集合  $F_k$  を行列  $D$  から求める ( $d_{ik} < \infty$  である故障要素i)。異常状態を示すセンサが複数個の場合は、各センサに対応する故障要素kについて求めた集合  $F_k$  の共通集合

$$\bigcap_k F_k$$

をとり、故障原因候補とする。

<ステップ2>故障影響波及時間による推定

(1) 正常状態を示すセンサに対応する故障要素  $j$  について、 $j$  に故障影響が確率 1 で波及する故障要素の集合  $G_j$  を行列  $C$  から求める ( $c_{ij} < \infty$  である故障要素  $i$ )。正常状態を示すセンサが複数個の場合は、各  $j$  について求めた集合の和集合

$$\bigcup_j G_j$$

を求める。

$$(2) \quad H = \left( \bigcap_k F_k \right) \cap \left( \bigcup_j G_j \right)$$

を求める。

$$H = \phi$$

ならば、すなわち、共通する要素  $i$  ( $\in H$ ) がない場合は、<ステップ1>で求めた故障原因候補を、正常情報を用いて絞ることができないため、<ステップ3>へ行く。

$$H \neq \phi$$

ならば、すなわち、共通する要素  $i$  がある場合は、以下の手順 (3) に示すように、波及時間により、共通要素  $i$  を故障原因候補から除外できるか否かを検討する。

(3) 故障要素  $i$  ( $\in H$ ) から正常を示すセンサに対応する故障要素  $j$  までの経路について以下のように故障影響波及時間の面から検討する。

$$(i) \quad \max_k \{ d_{ik} + t_0 - t_k \} < \min_j \{ c_{ij} \}$$

ならば、 $i$  を故障原因候補として残し、<ステップ3>へ、

$$(ii) \quad \max_k \{ d_{ik} + t_0 - t_k \} \geq \min_j \{ c_{ij} \}$$

ならば、 $i$  を故障原因候補から除く。

ここで、

$t_0$  : 故障原因推定の計算開始時刻

$t_k$  : センサに対応する故障要素  $k$  が異常値を示した時刻

である。

上記不等式の左辺は、 $i$  において故障発生後、少なくとも経過していると考えられる時間、右辺は  $i$  において故障が発生している場合には、異常が検出されるのに高々必要と考えられる時間を示している。

結局、(i) は現在正常状態を示すセンサが、異常になるか否かは、さらに時間の経過を待たねばならず、現時点では共通要素  $i$  ( $\in H$ ) が故障原因ではないと断定できないために、故障原因候補に含め、(ii) は、 $i$  が故障原因であれば、正常状態を示しているセンサは異常を示さなければならないということから、故障原因ではないとみなすことになる。共通要素が複数個ある場合は、それぞれについて〈ステップ 2〉の (3) を行ない、故障原因候補に含めるか否かを定める。〈ステップ 3〉 故障原因候補の数が多い場合には、多岐にわたる対策を考えなければならない。そこで、次に、適切な対策を考えやすくするために、複数個の故障原因候補について故障原因である可能性の順序付けを以下の手順で行なう。

- (1) 故障原因候補の中から、最も下流にある要素  $u$  を選ぶ。
- (2) 故障原因候補に含まれ、かつ  $u$  以外の要素  $v$  から  $u$  にいたるまでの故障影響波及確率  $q_{vu}$  と  $v$  自身の故障率  $p_v$  との積を求め、最も下流側にある要素  $u$  ( $\neq v$ ) 自身の故障率  $p_u$  も含めて、それらの値の大小を比較し、値の大きい順に故障原因である可能性が大きいとする。

結局、〈ステップ 3〉は各候補で故障が発生し、かつ最初に異常が検出されたセンサまで故障の影響が波及する確率の大小により順序付けを行なうことと同等である。

### 3. 2. 3 AND 故障要素の扱い方

故障原因推定法を AND 故障要素を含むネットワークモデルに適用する場合について考える。単一故障原因の前提があるため、論理的因果関係の観点からは AND 故障要素を OR 故障要素とみなしても正しく処理できる。しかし、故障影響波及時間は AND 条件が成立するかどうか分からない場合には正しく評価できない。そこで、〈ステップ 0〉 (1) の最小故障影響波及時間  $d_{ik}$  は、ネットワークモデルにおいてすべての AND 条件が成立

している場合の故障要素  $i$  から  $j$  までの故障影響波及時間であるから、ネットワークモデルにおいて AND 故障要素をすべて OR 故障要素とみなして計算する。〈ステップ 0〉

(2) の最大故障影響波及時間  $c_{ij}$  は、ネットワークモデルにおいてすべての AND 条件が不成立の場合の故障要素  $i$  から  $j$  までの故障影響波及時間であるから、ネットワークモデルにおいて AND 故障要素の入力枝を開放除去して計算する。

したがって、〈ステップ 0〉に上記の処理を追加すれば、〈前提条件 3〉は不要になる。

### 3. 2. 4 計算例

図 3. 2 に示すポンプ設備を対象として故障原因推定法を適用する。適用に際して必要なデータである故障率を表 3. 1 に、2 要素間の直接的な故障影響波及関係、距離、単位長さ当りの故障影響波及時間、波及確率を表 3. 2 に示す。

表 3. 1 ポンプシステムにおける故障要素と故障率

故障要素名称	故障要素番号	年間故障率
ソース	1	0. 0 0 0 1
スルース弁	2, 5, 1 0, 1 3	0. 5 7
ポンプ	3, 1 1	9. 4
電源	4, 1 2	1. 9
流量トランスミッタ	6, 1 4	0. 5 4
流量指示調節計	7, 1 5	0. 3 4
エアモータハンドル付弁	8, 1 6	0. 3 0
空気作動弁	9, 1 7	0. 3 0
シンク	1 8, 1 9	0. 0 0 0 1

以下では、センサは図 3. 2 の空気作動弁 9、流量指示調節計 1 5、空気作動弁 1 7、出力節点 1 9 とし、ノード 1 5 と 1 7 が正常、ノード 9 と 1 9 が異常と仮定し、故障原因を推定する。

<ステップ 0> (1) 表 3. 2 から行列 **B** (図 3. 3)、行列 **P** (図 3. 4) を得る。行列 **B** から行列 **D** (図 3. 5) を求める。

<ステップ 0> (2) 行列 **B** および行列 **P** から行列 **A** (図 3. 6) を得る。行列 **A** から行列 **C** (図 3. 7) を計算する。

<ステップ 0> (3) (1) の計算と同時に行列 **P** から行列 **Q** (図 3. 8) を計算する。

<ステップ 1> 行列 **D** から

$$\bigcap_k F_k = \{1, 2, 3, 4\}$$

を得る。



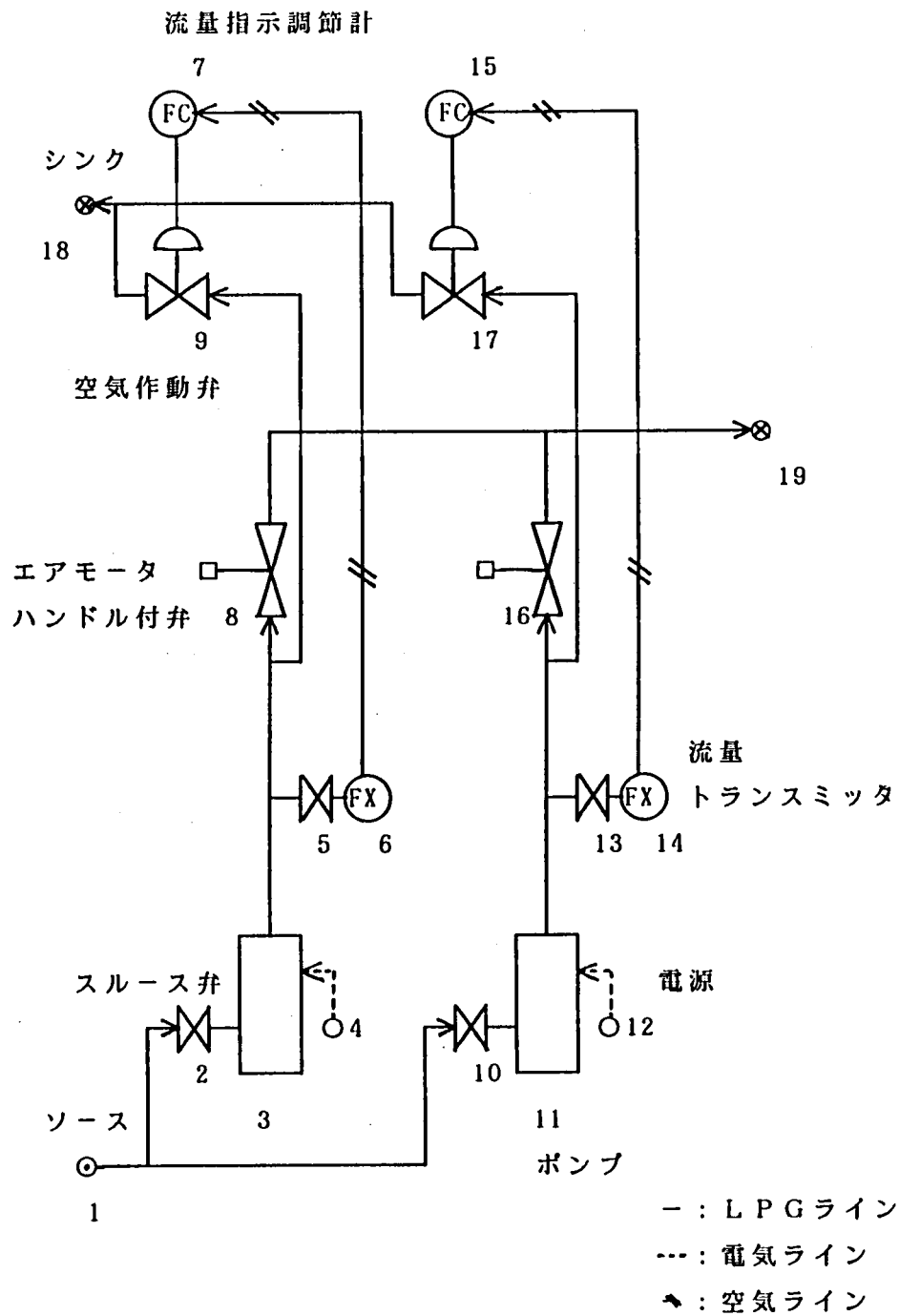


図 3. 2 ポンプシステム

表 3. 2 ポンプシステムにおける故障要素の結合関係

項番	故障影響波及関係	故障影響波及時間	故障影響波及確率
1	1 → 2	1 0 0	1. 0
2	1 → 1 0	1 0 0	1. 0
3	2 → 3	1 0 0	1. 0
4	3 → 5	1 0 0	0. 3
5	3 → 8	1 0 0	0. 1
6	3 → 9	1 0 0	1. 0
7	4 → 3	1	1. 0
8	5 → 6	1 0 0	1. 0
9	6 → 7	1 0	1. 0
1 0	7 → 9	1 0	1. 0
1 1	8 → 1 9	1 0 0	1. 0
1 2	9 → 1 8	1 0 0	1. 0
1 3	1 0 → 1 1	1 0 0	1. 0
1 4	1 1 → 1 3	1 0 0	0. 3
1 5	1 1 → 1 6	1 0 0	0. 1
1 6	1 1 → 1 7	1 0 0	1. 0
1 7	1 2 → 1 1	1	1. 0
1 8	1 3 → 1 4	1 0 0	1. 0
1 9	1 4 → 1 5	1 0	1. 0
2 0	1 5 → 1 7	1 0	1. 0
2 1	1 6 → 1 9	1 0 0	1. 0
2 2	1 7 → 1 8	1 0 0	1. 0

注) 故障の影響は左側の要素から右側の要素へ波及する。

$B =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	100							100										
2		0	100																
3			0	100			100	100											
4			1	0															
5					0	100													
6						0	10												
7							0	10											
8								0										100	
9									0								100		
10										0	100								
11											0	100		100	100				
12											1	0							
13													0	100					
14														0	10				
15															0	10			
16																0		100	
17																	0	100	
18																		0	
19																			0

※空白部分は $\infty$

図3. 3 隣接故障影響波及時間行列

$P =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	1								1									
2		1	1																
3			1		0.3			0.1	1										
4			1	1															
5					1	1													
6						1	1												
7							1		1										
8								1											1
9									1									1	
10										1	1								
11											1	0.3			0.1	1			
12											1	1							
13													1	1					
14														1	1				
15															1		1		
16																1			1
17																	1	1	
18																		1	
19																			1

※空白部分は0

図3.4 隣接影響波及確率行列

D =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	100	200		300	400	410	300	300	100	200		300	400	410	300	300	400	400
2		0	100		200	300	310	200	200									300	300
3			0		100	200	210	100	100									200	200
4			1	0	101	201	211	101	101									201	201
5					0	100	110		120									220	
6						0	10		20									120	
7							0		10									110	
8								0											100
9									0									100	
10										0	100		200	300	310	200	200	300	300
11											0		100	200	210	100	100	200	200
12											1	0	101	201	211	101	101	201	201
13													0	100	110		120	220	
14														0	10		20	120	
15															0		10	110	
16																0			100
17																	0	100	
18																		0	
19																			0

※空白部分は∞

図3. 5 最小故障影響波及時間行列

$A =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	100							100										
2		0	100																
3			0					100											
4			1	0															
5					0	100													
6						0	10												
7							0	10											
8								0										100	
9									0									100	
10										0	100								
11											0						100		
12											1	0							
13													0	100					
14														0	10				
15															0		10		
16																0			100
17																	0	100	
18																		0	
19																			0

※空白部分は $\infty$

図3. 6 隣接故障影響波及時間行列 (波及確率=1)

C =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	100	200						300	100	200						300	400	400
2		0	100						200									300	300
3			0						100									200	200
4			1	0					101									201	201
5					0	100	110		120									220	
6						0	10		20									120	
7							0		10									110	
8								0											100
9									0									100	
10										0	100							200	300
11											0							100	200
12											1	0						101	201
13													0	100	110			120	220
14														0	10			20	120
15															0			10	110
16																0			100
17																	0	100	
18																		0	
19																			0

※空白部分は $\infty$

図3. 7 最大故障影響波及時間行列

$$Q =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1	1	1		0.3	0.3	0.3	0.1	1	1	1		0.3	0.3	0.3	0.1	1	1	1
2		1	1		0.3	0.3	0.3	0.1	1									1	1
3			1		0.3	0.3	0.3	0.1	1									1	1
4			1	1	0.3	0.3	0.3	0.1	1									1	1
5					1	1	1		1									1	
6						1	1		1									1	
7							1		1									1	
8								1											1
9									1									1	
10										1	1		0.3	0.3	0.3	0.1	1	1	1
11											1		0.3	0.3	0.3	0.1	1	1	1
12											1	1	0.3	0.3	0.3	0.1	1	1	1
13													1	1	1		1	1	
14														1	1		1	1	
15															1		1	1	
16																1			1
17																	1	1	
18																		1	
19																			1

※空白部分は0

図3. 8 故障影響波及確率行列



<ステップ2>(1)行列 C から

$$UG_j = \{1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17\}$$

を得る。

<ステップ2>(2) 上記<ステップ1>と<ステップ2>(1)から

$$H = \{1\}$$

となる。

<ステップ2>(3) いま、

$$t_0 = t_{1,0} = 100, \quad t_0 = 0$$

とすると、

$$\max_k \{d_{1,k} + t_0 - t_k\} = 400$$

$$\min_j \{c_{1,j}\} = 300$$

となるため、ノード1を故障原因候補からはずす。

<ステップ3>(1)  $u = 3$

<ステップ3>(2) ノード2については

$$p_2 \cdot q_{2,13} = 0.57$$

ノード3については

$$p_3 = 9.4$$

ノード4については

$$p_4 \cdot q_{4,13} = 1.9$$

となるため、故障原因候補の順序は、ノード3、4、2となる。

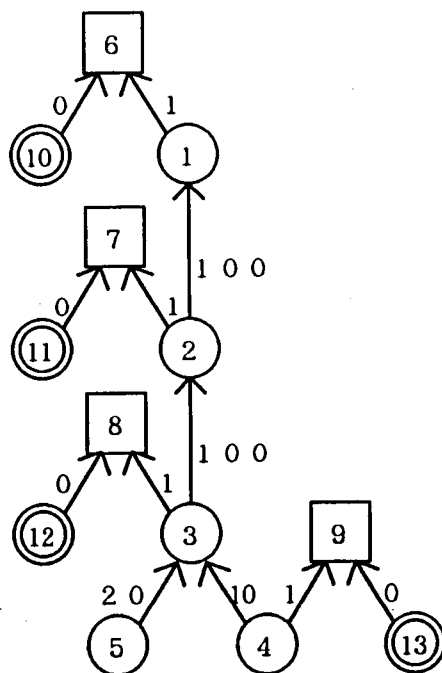
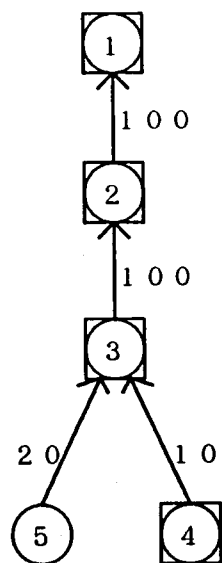
### 3. 3 センサ故障を含む条件下 での故障原因推定法の提案

#### 3. 3. 1 センサ誤作動故障と故障影響波及モデル

プラント異常というセンサからの情報の中に、センサ誤作動故障による誤情報も別途含まれている可能性があるという前提は、センサ誤作動故障とプラント構成機器の故障という多重故障を考えていることに相当する。ところが、複数の独立な故障がほとんど同時（故障影響が波及する程度の時間内）に発生する確率は無視できる程度に小さいので、このような前提は現実的でない。そこで、本節ではセンサ誤作動故障をプラント構成機器の故障形態の一つと考え、故障影響波及モデルに取り込み、故障原因（センサ誤作動故障を含む）は1個という前提で故障原因を推定するアプローチをとる。

3. 2 節では、故障影響波及モデルは、プラント構成機器の故障形態（例えば、ポンプ停止、配管つまり）を故障要素と呼び、故障要素間の直接の故障影響波及関係を故障波及方向、波及時間（遅延時間）、波及確率で定義した。これらのデータは、過去の事故例、設計図などの資料や事故の動的シミュレーション<sup>35)</sup>などから得ることができる。3. 2 節では、センサによって正常か異常かを判定できる故障要素をセンサと同一視し、センサ設置故障要素としていた〔図3. 9（a）参照〕。しかし、ここでは従来のモデルにセンサ誤作動故障を故障要素として新しく導入するために、センサと故障要素を区別する。通常、センサは波及先を持たない出力ノードとし、センサ誤作動故障は、対応するセンサ以外には波及先を持たない入力ノードとする〔図3. 9（b）参照〕。ただし、センサにはプラントの機能とは独立なものと、インタロックなどのように制御系に関するものがある。図3. 9の例は前者である。後者の場合にはセンサ信号そのものが他の故障要素の原因となりうるから、センサも波及先を持つようにモデル化しなければならない場合がある。たとえば、モータの軸温度高をセンサが検出すると制御系が作動しモータを停止するというシステムでは、センサ誤作動故障の場合にもモータ停止になるため図3. 10のようにモデル化する。また、誤作動故障の原因をさらに考慮する場合には、誤作動故障ノードに影響を与える故障原因も故障要素としてモデルに導入する。

提案モデルではセンサ誤作動故障を故障要素の一つとして扱っているので、提案モデルと3. 2 節のモデルの基本的な違いはセンサを故障影響波及モデルの独立な構成要素として扱う点だけである。したがって、提案モデルにおけるセンサを3. 2 節のモデルのセンサ設置故障要素とみなせば、前節の故障原因推定法をそのまま適用できる。



(a) 従来モデル

(b) 提案モデル

- ① : タンク水位低
  - ② : 配管流量小
  - ③ : ポンプ停止
  - ④ : 電源故障
  - ⑤ : ポンプ故障
  - ⑥ : タンク水位低検出
  - ⑦ : 配管流量小検出
  - ⑧ : ポンプ停止検出
  - ⑨ : 電源故障検出
  - ⑩ : タンク水位低検出器誤作動故障
  - ⑪ : 配管流量小検出器誤作動故障
  - ⑫ : ポンプ停止検出器誤作動故障
  - ⑬ : 電源故障検出器誤作動故障
- : 故障要素  
 □ : センサ  
 ◻ : センサ設置故障要素  
 ⊙ : センサ誤作動故障  
 $\xrightarrow{t}$  : 故障影響波及方向と波及時間 (秒)

図 3. 9 故障影響波及モデルにおけるセンサ

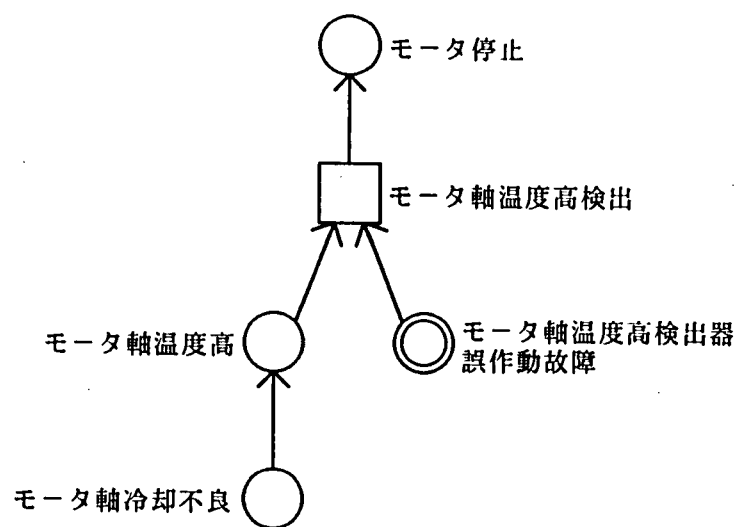


図 3. 1 0 制御系を含む故障影響波及モデル

### 3. 3. 2 センサ不作動故障と故障原因推定法

3. 3. 1 項では、ほとんど同時に複数の独立な故障が発生する可能性を無視し、センサ誤作動故障も含めて単一故障原因を仮定した。しかし、異常が検出された場合にセンサ不作動故障が既に発生している可能性もある。そこで、故障の因果関係に矛盾があるために3. 2 節の故障原因推定法では故障原因が求められない場合に、センサ不作動故障を仮定することで矛盾を解消して推定を可能にするアプローチをとる。

#### (1) 前提条件

＜前提条件1＞ 故障影響波及モデル中のセンサ要素には正常か異常かの情報が与えられる。

＜前提条件2＞ センサ不作動故障以外の故障原因は一つ。

センサからの情報に基づいて故障原因を推定するためには＜前提条件1＞は不可欠である。ただし、センサ情報はセンサ故障により誤っている可能性がある。なお、一度異常を示したセンサは正常に復帰してもプラント全体が正常になるまで異常とみなし、最初の異常検出時刻を記憶しておく。これは、一時的な異常や異常の状態が時間的に変動する場合にも故障原因を推定するためである。＜前提条件2＞は多重故障（複数の独立な原因による故障）は発生頻度が低いので扱わないことを意味する。ただし、センサ不作動故障は発生した時点では検出できないので別扱いとする。

#### (2) センサ不作動故障の推定

3. 2 節の故障原因推定法の手順の概要を次に示す。

＜ステップ1＞ 異常検出センサから故障影響の波及方向を逆にたどり、その経路上にある故障要素の集合を故障原因候補とする。異常検出センサが複数個ある場合には、集合の共通部分を候補とする。

＜ステップ2＞ 故障原因候補の中で正常状態をしめすセンサまでの故障影響波及時間が異常検出センサまでの波及時間よりも短いものを候補から除く。

＜ステップ3＞ ＜ステップ2＞で残った故障原因候補が複数個である場合、候補をその要素自身の故障率と異常を示す要素までの故障影響波及確率との積が大きい順に順位付けする。

センサ不作動故障の推定は、3. 2 節の＜ステップ2＞の手順を利用して行なう。そこで、3. 2 節の＜ステップ2＞について再度詳細に述べる。

故障要素  $i$  が故障原因であると仮定した場合に、少なくとも経過している時間  $w_i$  を現在時刻  $t_0$  とセンサ  $k$  で異常が検出された時刻  $t_k$ 、故障原因  $i$  からセンサ  $k$  までの故障影響波及時間  $d_{ik}$  から求める。

$$w_i = \max_k \{ d_{ik} + t_0 - t_k \} \quad (3. 1)$$

(3. 1) 式の右辺カッコ内の値はモデルに与えられた波及時間値と実際の観測時間値に誤差がなければセンサ  $k$  に関係なくすべて一致する。

次に、故障要素  $i$  が故障原因であると仮定した場合に、現在正常状態を示しているセンサ  $j$  の少なくとも一つが異常を示すのに必要な時間  $r_i$  を故障原因  $i$  からセンサ  $j$  までの故障影響波及時間  $c_{ij}$  から求める。

$$r_i = \min_j \{ c_{ij} \} \quad (3. 2)$$

次式が成立する場合には、故障要素  $i$  は故障原因候補であるとする。

$$w_i < r_i \quad (3. 3)$$

上式が成立しない場合には、故障要素  $i$  が故障原因であるなら、現在正常状態を示しているセンサの少なくとも一つは異常になるはずである。したがって、故障要素  $i$  は故障原因候補から除く。以上が 3. 2 節で提案した方法における〈ステップ 2〉の手順である。

ところが、ここで

$$w_i \geq c_{ij}$$

となるセンサ  $j$  が不動作故障であると仮定すると、(3. 3) 式が成立しない場合でも  $i$  を故障原因候補とすることができる。このことから、故障要素  $i$  を故障原因と仮定した場合、

$$w_i \geq c_{ij} \quad (3. 4)$$

となるセンサ  $j$  が 1 個以内の場合には、センサ  $j$  が不動作故障という仮定のもとで故障原因は  $i$  であるという推定を行なうことにする。センサ  $j$  が 2 個以上ある場合には、複数個のセンサ不動作故障発生の可能性は低いため、従来どおり故障要素  $i$  を故障原因要素から除く。

また、〈ステップ 2〉で残った故障原因候補が複数個である場合には、〈ステップ 3〉に示すように可能性の高い順に順位付けすればよい。ただし、センサ不動作故障を仮定した故障原因候補は、そうでない故障原因候補より故障原因である可能性は低いと考えられるので、そうでない故障原因候補より順位を下位とする。

### 3. 3. 3 計算例

簡単な数値例（図 3. 9 (a)）を用いて、3. 3. 1 項、3. 3. 2 項で示したセンサ故障へのアプローチを説明する。図 3. 9 の例は、プラントの一部の故障影響波及関係を表すものであるが、ここではこれを全体モデルとみなす。また、説明を簡単にするために故障要素間の故障影響波及確率はすべて 1. 0 と仮定する。以下、〈ケース 1〉ではセンサ誤作動故障が発生した場合、〈ケース 2〉ではセンサ不作動故障が発生した場合の故障原因推定法について説明する。

〈ケース 1〉 センサ 9 が誤作動故障を起こした場合について考える。

(1) センサ 9 で異常が検出される ( $t_0 = 0$ ,  $t_9 = 0$ )。

〈ステップ 1〉 故障原因候補はセンサ 9 に故障影響を与える故障要素 4 と 13 である。

〈ステップ 2〉

$$w_4 = d_{4,9} + t_0 - t_9 = 1$$

$$w_{13} = d_{13,9} + t_0 - t_9 = 0$$

$$r_4 = \min \{c_{4,6}, c_{4,7}, c_{4,8}\} = \min \{211, 111, 11\} = 11$$

$$r_{13} = \infty$$

したがって、

$$w_4 < r_4, w_{13} < r_{13}$$

であるから、故障要素 4、13 は両方とも故障原因候補である。

(2) (1) から 2 分後も変化なし ( $t_0 = 120$ ,  $t_9 = 0$ )。

〈ステップ 1〉 故障原因候補は故障要素 4 と 13 である。

〈ステップ 2〉

$$w_4 = d_{4,9} + t_0 - t_9 = 121$$

$$w_{13} = d_{13,9} + t_0 - t_9 = 120$$

$$r_4 = \min \{c_{4,6}, c_{4,7}, c_{4,8}\} = \min \{211, 111, 11\} = 11$$

$$r_{13} = \infty$$

したがって、

$$w_4 > r_4$$

である。ここで、

$$w_4 \geq c_{4j}$$

となるセンサ  $j$  は 7、8 の 2 個であるので、センサ不動作故障は仮定せず、故障要素 4 を故障原因候補から除く。一方、

$$w_{13} < r_{13}$$

であるから故障要素 13、すなわちセンサ 9 の誤作動故障が故障原因と推定できる。

ここでは、1 個のセンサ不動作故障を仮定した場合に、故障要素 4 が故障原因である可能性とセンサ誤作動故障 13 である可能性を検討している。

<ケース 2> センサ 7 が不動作故障を起こしている状態で、故障要素 4 が故障原因となった場合について考える。

(1) 最初は<ケース 1> (1) と同じ状態になり、同じ結論を得る。

(2) 最初の異常検出 (センサ 9) から 2 分後にはセンサ 8 でも異常が検出されている ( $t_{9s} = 120$ ,  $t_{8s} = 10$ ,  $t_{7s} = 0$ )。

<ステップ 1> 故障原因候補はセンサ 8、9 の両方に故障影響を与える故障要素 4 である。

<ステップ 2>

$$\begin{aligned} w_4 &= \max \{ d_{4,8s} + t_{9s} - t_{8s}, d_{4,9s} + t_{8s} - t_{9s} \} = \max \{ 121, 121 \} \\ &= 121 \end{aligned}$$

$$r_4 = \min \{ c_{4,8s}, c_{4,9s} \} = \min \{ 211, 111 \} = 111$$

したがって、

$$w_4 > r_4$$

である。ここで、



$$w_i \geq c_{4j}$$

となるセンサ  $j$  は 7 だけであるので、センサ 7 が不作動故障という仮定で、故障要素 4 を故障原因と推定できる。

なお、本方法を実際に適用する場合には、適当な周期でセンサによるプラント異常検出の有無をサンプリングし、異常が検出されると、その異常原因が除去されてすべてのセンサが正常を示すようになるまで、サンプリング周期またはその整数倍の周期で故障原因推定演算を行なうことが必要である。これは上記の数値例で示したように、時間の経過と共に故障原因候補数を絞れる可能性があるからである。サンプリング周期は故障影響波及時間の最大公約数(図 3. 9 の例では 1 秒) 以下が望ましい。

### 3. 3. 4 提案方法と CCT アプローチの比較

#### (1) センサ誤作動故障

従来モデルの例(図 3. 9 (a)) はツリーモデルであるから、CCT によるアプローチが適用可能であるが、提案モデルの例(図 3. 9 (b)) はネットワークモデルであるため、CCT アプローチは適用できない。一方、CCT アプローチによるセンサ誤作動故障の検出は、多重原因故障と推定し、かつそれらの原因に共通のプロセス量に関係している場合にデータ収集系の故障とみなすというものである。これは、データ収集系を共通原因とするネットワークモデルとして表現可能であるから、CCT アプローチにより検出可能なセンサ誤作動故障は提案方法によっても検出可能である。したがって、提案方法のほうが CCT アプローチよりも検出できるセンサ誤作動故障の形態が多いといえる。

#### (2) センサ不作動故障

CCT アプローチはツリーモデルにおいて異常検出ノード(エントリーノード)を出発点として、波及方向を逆にたどり、それを成立させる 1 次原因ノード(可観測)の組合せ(カットセット)を求めるものである。次の条件を満足する可観測ノードをホールと呼ぶ。

(a) そのノードは正常である。

(b) 他のセンサの状態からそのノードの状態を異常と仮定できる。

すなわち、ホールとは不作動故障センサのことを意味していると言える。ホールは、カットセットを求める過程で、正常を示すノードを異常とみなしたほうがよい場合に仮定される。このとき、次の規則を適用する。

(c) 2 つの連続するホールは認めない。

(d) 最上位の異常を示すノードとそのカットセットの間のホールは特定数(推奨値は 1) 以下であること。

(e) 1 次原因ノードはホールとしない。

すなわち、ホールは異常を示すセンサの間にある正常を示すセンサである。したがって、従来モデルの例(図 3. 9 (a)) において、3. 3. 3 項の計算例<ケース 2>に適用すると、CCT アプローチではノード 3、4 と波及方向を逆にたどり、故障原因(ノード

4) は求めることができる。しかし、不作動故障のセンサ（ノード2）は演算に無関係であるから、不作動故障のセンサが存在することを指摘できないことになる。逆に、CCTアプローチにおいてホールとみなされるノードは、異常を示すセンサノードへ影響を与えるような正常を示すセンサノードであることから、故障影響波及モデルの故障影響波及確率がすべて1の場合には必ず（3. 4）式が成立し、センサ不作動故障とみなすことができる。したがって、故障影響波及モデルの故障影響波及確率がすべて1の場合には提案方法のほうが、CCTアプローチよりもセンサ不作動故障の推定能力が優るといえる。

### 3. 4 センサ出力パターン 照合形故障原因推定法の提案

3. 3 節で提案した故障原因推定法の実用化における課題として、(1) 故障影響波及モデルに与える故障影響波及時間の誤差や故障の程度による波及時間の変動の処理方法、(2) センサ不作動故障を仮定する基準、がある。そこで、本節では、上記の課題(1)、(2)を解決する故障原因推定法を提案する。

従来の故障原因推定法は大きく二つに分類できる。<sup>35)</sup>第一は、観測されたセンサの示す正常や異常の出力パターンがどの故障原因によるパターンであるかを、前もって作成されたパターンと故障原因とを対応させた決定表から探し出す「リスト処理による方法」である。第二は、故障の影響の波及経路をたどる「因果関係に基づく方法」である。「リスト処理による方法」は、演算が簡単のため高速処理が可能である。しかし、同じ故障原因でもそれを発見する時間の差異によって全く異なるセンサ出力パターンを観測することになる場合がある。したがって、非常に多数のパターンを用意しなければならないという問題があり、適用対象の大きさに限界がある。一方、「因果関係に基づく方法」は、事前に全てのパターンを用意する必要はない。しかし、演算が複雑になるのでオンライン化するためには処理時間の事前評価が問題になる。

3. 3 節で提案した故障原因推定法は、「因果関係に基づく方法」を拡張し、故障の因果関係と影響波及の時間遅れを時間・確率付有向グラフで表現したモデルに基づくものであった。本モデルは、従来の主要なアプローチであるツリーモデルと<sup>3)</sup>比較して複雑な故障影響波及関係を記述する能力に優れている。さらに、この方法は、故障影響波及時間を利用して故障原因を絞るという特徴を持つ。これは、プラントでは同じ故障原因でもそれを診断する時間の差異によって異なるセンサ情報を得る場合があることを積極的に利用するものである。

そこで、本節では時間・確率付有向グラフ逆方向探索による故障原因推定法を改良し、上記の課題を解決する。課題(1)は、故障影響波及モデルに最大値と最小値を導入し、従来法とは異なるアプローチをとることによって解決する。それは、ある要素が故障原因である場合に予想されるセンサの出力パターンを生成し、実際のセンサ出力パターンと照合するというアプローチであり、センサ出力パターンに不確定部分の存在を認めるものである。課題(2)は、故障確率をセンサ不作動仮定の評価尺度に導入することで解決する。

#### 3. 4. 1 モデルと前提条件

##### (1) 故障影響波及モデル

3. 3 節の故障影響波及モデルは、プラント構成機器の故障形態（たとえば、ポンプ停止、配管つまり）をネットワークのノードに対応させ、隣接ノード間の故障影響波及関係を波及時間（遅延時間）、波及確率を持つ有向枝で定義した。これらのデータは、過去の事故例、設計図などの資料や事故の動的シミュレーションなどから得ることができる。

本節では、故障影響波及時間に最大値と最小値を導入する。従来モデルでは故障影響波及時間を一定値としていたが、故障形態の定義にあいまいさ（たとえば、ポンプ故障、ストレーナつまり）がある場合などでは、波及時間を正確に決定することが困難であった。ところが、モデルに与えた波及時間と実際の波及時間が異なる場合には推定結果を誤る可能性があった。そこで、最大値と最小値を導入し、推定結果を誤らないように実際の波及時間を含む時間幅を与えるようにする。

さらに、故障要素には故障確率を、センサには誤差動確率と不作動確率を与える。故障確率は、指数分布を仮定すると例えば故障率を $\lambda$ 、平均点検間隔時間を $T$ とすると、

$$1 - e^{-\lambda T}$$

と与えても良い。ただし、厳密には $T$ は使用開始からの経過時間である。また、従来法で利用していた故障影響波及確率は、正確に与えることが難しいため、ここでは波及確率が1未満の波及関係に対応する波及時間の最大値を $\infty$ として利用するにとどめる。したがって、以下では波及確率には言及しない。

ネットワークモデルの全ノード集合を $V$ とすると、 $V$ は故障形態を表わすノードの集合 $M$ と状態の正常、異常を検出することができるセンサノードの集合 $S$ からなる。また、隣接最大故障影響波及時間行列を

$$A = \{ a_{ij} \} \quad (i, j \in V) \quad (a_{ij} : \text{ノード } i \text{ から隣接ノード } j \text{ への直接最大故障影響波及時間})$$

隣接最小故障影響波及時間行列を

$$B = \{ b_{ij} \} \quad (i, j \in V) \quad (b_{ij} : \text{ノード } i \text{ から隣接ノード } j \text{ への直接最小故障影響波及時間})$$

とする。故障形態 $m$  ( $\in M$ ) の中で故障原因となる可能性のあるノードの集合を故障原因候補ノード集合 $F$ とする。すなわち、その故障形態自身は二次故障原因であり、真の故障原因にはならないから $m \in F$ としてよい。たとえば、図3. 11の例はプラントの一部の故障影響波及関係を表わす。本例では、

$$V = \{ 1, 2, \dots, 13 \}$$

$$M = \{ 1, 2, \dots, 9 \}$$

$$S = \{ 10, 11, 12, 13 \}$$

$$F = \{1, 2, \dots, 9\}$$

となる。しかし、ポンプ停止（ノード3）の一次原因が電源故障（ノード4）とポンプ故障（ノード5）だけならば、 $3 \in F$ としてよい。また、隣接最大故障影響波及時間行列 **A** は図3. 12 (a)、隣接最小故障影響波及時間行列 **B** は図3. 12 (b) のようになる。

## (2) 前提条件

3. 3節と同様の前提条件を設ける。

<前提条件1> 故障影響波及モデル中のセンサには正常か異常かの情報が与えられる。

<前提条件2> 真の故障原因（センサ故障を除く）は一つ。

<前提条件3> 故障影響波及モデルはORノード（隣接する複数個のノードのうち少なくとも一つのノードから故障の影響を受けた場合に、その影響が隣接するノードに波及するもの）のみから構成される。

センサからの情報に基づいて故障原因を推定するためには<前提条件1>は不可欠である。なお、一度異常を示したセンサは、正常に復帰してもプラント全体が正常になるまで異常とみなし、最小の異常検出時刻を記憶しておく。これは、一時的な異常や異常の状態が時間的に変動する場合にも故障原因を推定できるようにするためである。多重故障（複数の独立な故障原因による故障）は発生頻度が低いので、<前提条件2>を設ける。<前提条件3>はANDノード（故障の影響を直接に受けるノードのすべてから故障の影響を受けた場合に、その影響が隣接するノードへ波及するもの）を扱わないことを意味する。ただし、<前提条件2>があるため、論理的因果関係の観点からはANDノードをORノードとみなしてよい。さらに、ANDノードのすべての入力枝の直接最大故障影響波及時間を $\infty$ とおけば、条件不成立の場合がモデルに含まれるから波及時間の観点からもORノードとして扱うことができる。

## 3. 4. 2 故障原因推定法

本節では、ある要素が故障原因である場合に予想されるセンサ出力パターンと実際のセンサ出力パターンとが一致するかどうかを調べることで、故障原因の推定を行なうアプローチを採る。

プラントにおいては、ある故障原因によるセンサの出力パターンを求める場合に次のような問題がある。

「設備の中で生じた異常状態はプラントが運転されている限りは次第に他の部分へも影響が波及して行くので、異常のパターンも時間と共に変化することになる。すなわち、同じ異常原因でもそれを発見する差異によって全く異なるパターンを観察することになる。」<sup>35)</sup>

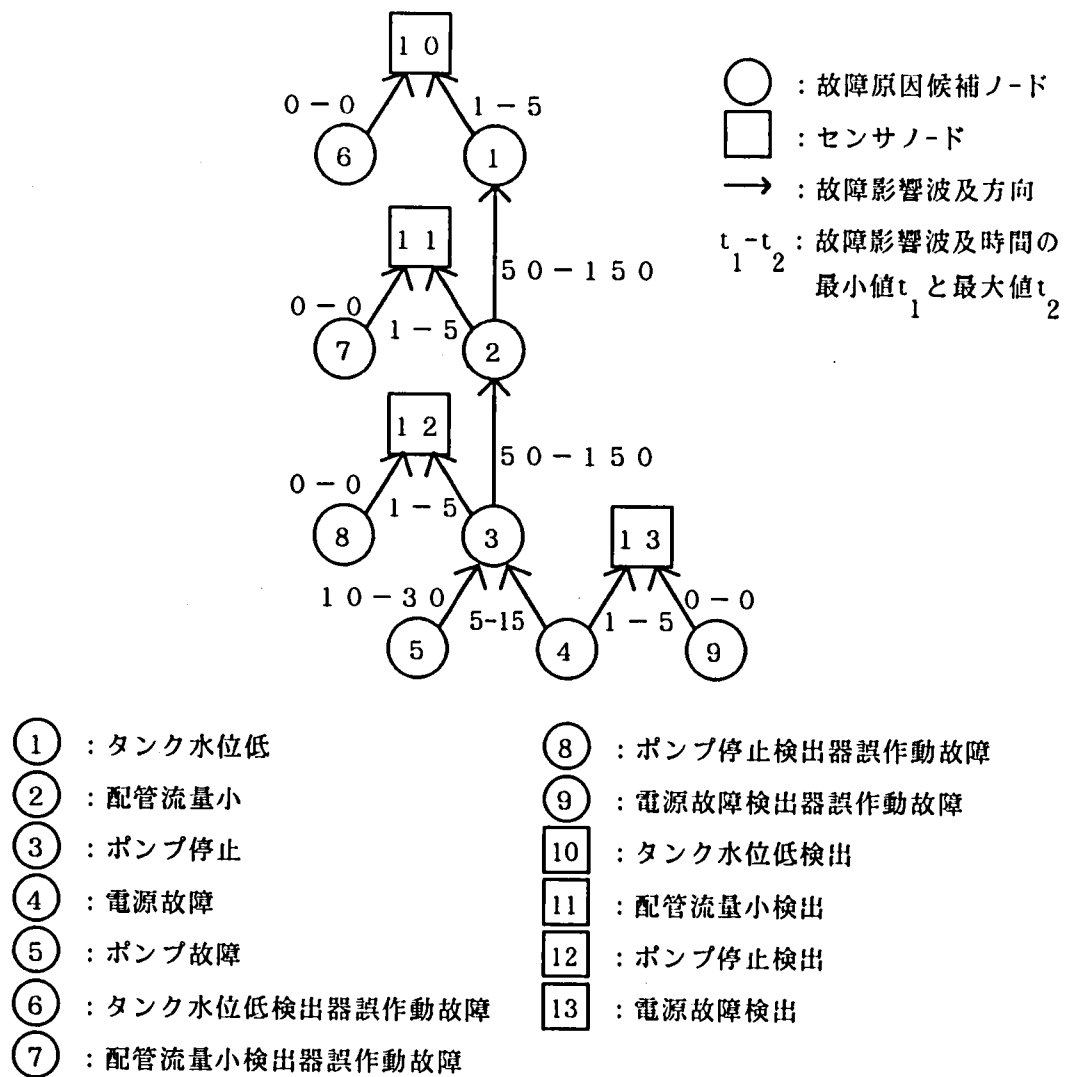


図3. 1.1 故障影響波及モデル

( a ) 最大隣接故障影響波及時間行列

$$A =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0									5			
2	150	0									5		
3		150	0									5	
4			15	0									5
5			30		0								
6						0				0			
7							0				0		
8								0				0	
9									0				0
10										0			
11											0		
12												0	
13													0

※空白部分は $\infty$

( b ) 最小隣接故障影響波及時間行列

$$B =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0									1			
2	50	0									1		
3		50	0									1	
4			5	0									1
5			10		0								
6						0				0			
7							0				0		
8								0				0	
9									0				0
10										0			
11											0		
12												0	
13													0

※空白部分は $\infty$

図 3. 1 2 隣接故障影響波及時間行列

そこで、本節では、最初の異常検出からの経過時間に対応する異常パターンを故障影響波及関係（波及方向、波及時間）から求める。また、故障影響波及時間の誤差の問題は故障影響波及モデルに与えられた波及時間の最大値と最小値を利用して、生成するセンサ出力パターンに不確定部分の存在を認めることで解決する。さらに、センサ故障仮定基準は、センサ故障の確率と推定原因の故障確率を比較し、センサ故障確率が推定原因の故障確率より大きい場合にセンサ故障を仮定するというものにする。

#### （１） 故障原因推定手順

次の＜ステップ１～４＞をオフラインで実行する。

＜ステップ１＞ 隣接最大故障影響波及時間行列  $A$  から、ネットワークにおける任意のノード間の最短距離を求めるDijkstra法を用いて、すべての故障原因候補ノード  $f$  ( $\in F$ ) からセンサノード  $s$  ( $\in S$ ) までの最短故障影響波及時間を求める。＜前提条件３＞から、最も早い故障影響波及時間がそのノードの故障影響波及時間であるから、これは  $f$  で故障が発生してから  $s$  で異常が検出されるのに高々必要な時間、すなわち最大故障影響波及時間  $c_{fs}$  になる。

＜ステップ２＞ ＜ステップ１＞と同様に隣接最小故障影響波及時間行列  $B$  から最小故障影響波及時間  $d_{fs}$  ( $f \in F, s \in S$ ) を求める。

＜ステップ３＞ すべての  $f$  ( $\in F$ )、 $s$  ( $\in S$ ) について、 $f$  で故障発生した場合に最初の異常検出から  $s$  で異常検出されるまでに高々必要な時間  $e_{fs}$  を次式から求める。

$$e_{fs} = c_{fs} - \min_{j \in S} \{ d_{fj} \} \quad (3.5)$$

ただし、上式の右辺第２項は  $f$  で故障発生した場合に、最初に異常が検出されるまでに少なくとも必要な時間を表わす。

＜ステップ４＞ すべての  $f$  ( $\in F$ )、 $s$  ( $\in S$ ) について、 $f$  で故障発生した場合に最初の異常検出から  $s$  で異常検出されるまでに少なくとも必要な時間  $g_{fs}$  を次式から求める。

$$g_{fs} = d_{fs} - \min_{j \in S} \{ c_{fj} \} \quad (3.6)$$

ただし、上式の右辺第２項は  $f$  で故障発生した場合に、最初に異常が検出されるまでに高々必要な時間を表わす。

オンライン演算のために最大異常検出時間行列

$$E = \{ e_{fs} \} \quad (f \in F, s \in S)$$



おとび最小異常検出時間行列

$$G = (g_{fs}) \quad (f \in F, s \in S)$$

を記憶しておく。

以下では、最初の異常検出から経過時間  $t$  後に診断を開始する場合の手順を示す。ただし、最初の異常検出からセンサ  $m$  ( $\in M(t)$ ) での異常検出までの経過時間を  $t_m$  とする。

すべての  $f$  ( $\in F$ ) について、次のステップを実施する。

$$\langle \text{ステップ 5} \rangle \quad S_{af} = \phi \quad df$$

$$S_{df} = \phi$$

$$r = 1.0$$

とおく。これは、センサ誤作動故障要素集合  $S_{af}$ 、センサ不作動故障要素集合  $S_{df}$ 、センサ故障確率  $r$  の初期値設定である。

$\langle \text{ステップ 6} \rangle$  すべての異常検出センサ  $m$  ( $\in M(t)$ ) について次の計算を行う。

$$t_m < g_{fm} \quad \text{または} \quad t_m > e_{fm} \quad (3.7)$$

ならば、

$$S_{af} \leftarrow S_{af} + \{m\}$$

$$r \leftarrow r \cdot r_{am}$$

とする。ただし、 $r_{am}$  はセンサ  $m$  の誤作動確率である。他の場合には何もしない。

これは、 $f$  で故障が発生した場合には

$$g_{fm} \leq t_a \leq e_{fm}$$

となるはずであるから、それ以外の原因による異常検出、すなわちセンサの誤作動故障と仮定することを意味する。

<ステップ7> すべての異常未検出センサ  $n$  ( $\in N(t)$ ) について次の計算を行う。

$$t \geq e_{fn} \quad (3.8)$$

ならば、

$$S_{df} \leftarrow S_{df} + \{n\}$$

$$r \leftarrow r \cdot r_{dm}$$

とする。ただし、 $r_{dm}$  はセンサ  $m$  の不作動確率である。他の場合には何もしない。

これは、 $f$  で故障が発生した場合には異常未検出なセンサ  $n$  については

$$t < e_{fn}$$

となるはずであるから、センサ  $n$  の不作動故障と仮定することを意味する。

$$<\text{ステップ8}> (i) \quad r \geq r_f$$

ならば、 $f$  は故障原因と推定する。

これは、センサ故障の発生確率が故障発生確率と同程度以上であるから、センサ故障の仮定を認めることを意味する。このとき、誤作動故障を仮定するセンサは  $S_{af}$  で、不作動故障を仮定するセンサは  $S_{df}$  で与えられる。

$$(ii) \quad r < r_f$$

ならば、 $f$  は故障原因ではないと推定する。

これは、センサ故障の発生確率が故障発生確率より小さいから、センサ故障の仮定に無理があると判断することを意味する。

なお、センサ故障の仮定を設けない場合には、<ステップ6>または<ステップ7>において条件式(3.7)または(3.8)が少なくとも一つ成立した時点で  $f$  を故障原因でないと推定できる。このとき<ステップ7>は予想されるセンサ出力パターンと実際に観測されたセンサ出力パターンとを照合していることになる。また、故障影響波及時間

最大値と最小値を与えたことにより、最初の異常検出からセンサ m での異常検出までの経過時間に

$$g_{fm} \leq t_m \leq e_{fm}$$

という時間幅を認めている。

### (3) 計算例

図 3. 1 1 のモデルを用いて、故障原因推定の計算例を示す。

<ステップ 1> ダイクストラ法を用いて行列  $A$  (図 3. 1 2 (a)) から最大故障影響波及時間行列  $C$  (図 3. 1 3 (a)) を求める。

<ステップ 2> ダイクストラ法を用いて行列  $B$  (図 3. 1 2 (b)) から最小故障影響波及時間行列  $D$  (図 3. 1 3 (b)) を求める。

<ステップ 3> (3. 5) 式を用いて行列  $C$ 、 $D$  から最大異常検出時間行列  $E$  (図 3. 1 4 (a)) を求める。

<ステップ 4> (3. 6) 式を用いて行列  $C$ 、 $D$  から最小異常検出時間行列  $G$  (図 3. 1 4 (b)) を求める。なお、負値をとる  $g_{fs}$  は  $f$  が故障原因ならば、 $s$  で最初

に異常が検出される可能性があることを意味し、絶対値は意味を持たない。

ここで、

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 0.1,$$

$$r_6 = r_{a10} = r_7 = r_{a11} = r_8 = r_{a12} = r_9 = r_{a13} = 0.2,$$

$$r_{d10} = r_{d11} = r_{d12} = r_{d13} = 0.1$$

とする。

$$t_{1,1} = 0, t_{1,2} = 10, t_{1,3} = 250, t = 300$$

であるとき、次のように計算する。

$$\text{<ステップ 5> } S_{a1} = \phi$$

$$S_{d1} = \phi$$

$$r = 1.0$$

$$\langle \text{ステップ6} \rangle \quad S_{a1} = \{10, 12, 13\}$$

$$r = r_{a10} \cdot r_{a12} \cdot r_{a13} = 8.0 \times 10^{-3}$$

$$\langle \text{ステップ7} \rangle \quad S_{d1} = \phi$$

$$r = 8.0 \times 10^{-3}$$

$$\langle \text{ステップ8} \rangle \quad r < r_i$$

であるから、故障要素1は故障原因ではない。

同様に故障要素2, 3, 5, 6, 7, 8, 9は故障原因ではない。一方、故障要素4については次のようになる。

$$\langle \text{ステップ6} \rangle \quad S_{a4} = \phi$$

$$r = 1.0$$

$$\langle \text{ステップ7} \rangle \quad S_{d1} = \{11\}$$

$$r = r_{d11} = 0.1$$

$$\langle \text{ステップ8} \rangle \quad r \geq r_i$$

であるから、故障要素4はセンサ11の不作動故障を仮定のもとに故障原因である。

(a) 最大故障影響波及時間行列

$$C =$$

	10	11	12	13
1	5			
2	155	5		
3	305	155	5	
4	320	170	20	5
5	335	185	35	
6	0			
7		0		
8			0	
9				0

(b) 最小故障影響波及時間行列

$$D =$$

	10	11	12	13
1	1			
2	51	1		
3	101	51	1	
4	106	56	6	1
5	111	61	11	
6	0			
7		0		
8			0	
9				0

※空白部分は $\infty$ 

図 3. 1 3 故障影響波及時間行列

(a) 最大異常検出時間行列

$$E =$$

	10	11	12	13
1	4			
2	154	4		
3	304	154	4	
4	319	169	19	4
5	324	174	24	
6	0			
7		0		
8			0	
9				0

(b) 最小異常検出時間行列

$$G =$$

	10	11	12	13
1	-4			
2	46	-4		
3	96	46	-4	
4	101	51	1	-4
5	76	26	-24	
6	0			
7		0		
8			0	
9				0

※空白部分は $\infty$ 

図 3. 1 4 異常検出時間行列

### 3. 4. 3 提案方法と時間・確率付有向グラフ逆方向探索による 故障原因推定法との比較

本節で提案した方法（以下、提案方法と呼ぶ）と3. 3節で提案した方法（以下、従来方法と呼ぶ）について、センサ故障仮定基準と診断精度の2点に関して比較する。

#### （1）センサ故障仮定基準

従来方法では、センサ誤作動故障は故障影響波及モデルの一構成要素として扱い、センサ不作動故障は、推定された故障原因から異常を検出したセンサまでの故障影響波及時間と正常状態を示しているセンサ間での波及時間を比較し、矛盾がある場合に正常状態を示しているセンサを不作動故障であると推定する。したがって、センサ誤作動故障は異常が検出されたが機器故障が原因でない場合に仮定される。センサ不作動故障については明確な基準を設けられなかった。これは、何個のセンサ不作動故障仮定までを認めるかの個数設定基準を決めるのが困難であったからである。そこで、故障影響波及予測・診断システムではセンサ不作動故障の仮定なしには故障原因を推定できない場合にセンサ不作動故障を仮定する個数に関係なくすべてを故障原因候補としていた。

一方、提案方法では、故障原因の発生確率に比べてセンサ故障の発生確率が大きい場合にセンサ故障を仮定する。したがって、従来方法のように個数を基準にしたり、無制限にするよりは提案方法の方が合理的な基準と考える。ただし、提案方法ではセンサ故障以外の故障原因の存在を仮定しているから、センサ誤作動故障が原因による異常検出を正しく処理するためには従来方法と同じようにセンサ誤作動故障を故障影響波及モデルに取り込む必要がある。

#### （2）診断精度

ここでは、センサ故障がないと仮定した場合の診断精度について検討する。

従来方法を故障影響波及時間の最大値と最小値を利用できるように拡張すると、

$$\max_{m \in M(t)} \{d_{fm} + t_m - t_m\} < \min_{n \in N(t)} \{e_{fn}\} \quad (3.9)$$

が成立すると  $f$  を故障原因候補と推定することになる。

一方、提案方法は、すべての  $m (\in M(t))$  について

$$g_{fm} \leq t_m \leq e_{fm}$$

すなわち、

$$d_{fm} - \min_{j \in S} \{c_{fj}\} \leq t_m \leq c_{fm} - \min_{j \in S} \{d_{fj}\} \quad (3.10)$$

が成立し、かつすべての  $n (\in N(t))$  について

$$e_{fn} > t$$

すなわち、

$$c_{fn} - \min_{j \in S} \{d_{fj}\} > t \quad (3.11)$$

が成立すると、 $f$  を故障原因候補と推定する。

(3.10) 式から、

$$d_{fm} - t_m \leq \min_{j \in S} \{c_{fj}\}$$

すべての  $m (\in M(t))$  について成立するから、

$$\max_{m \in M(t)} \{d_{fm} - t_m\} \leq \min_{j \in S} \{c_{fj}\}$$

したがって、

$$\max_{m \in M(t)} \{d_{fm} + t - t_m\} \leq \min_{j \in S} \{c_{fj}\} + t \quad (3.12)$$

が成立する。

診断精度の優劣は (3.9)、(3.12) 式の右辺の大小によって決まる。

$$\min_{j \in S} \{c_{fj}\} = \min_{j \in S} \{d_{fj}\} + \Delta d \quad (\Delta d \geq 0) \quad (3.13)$$

とおくと (3.10) 式から、

$$\max_{m \in M(t)} \{d_{fm} + t - t_m\} \leq \min_{j \in S} \{c_{fj}\} + \Delta d + t \quad (3.14)$$

一方、(3.11) 式から、

$$\min_{j \in S} \{d_{fj}\} + t < e_{fn}$$

すべての  $n (\in N(t))$  について成立するから、

$$\min_{j \in S} \{d_{fj}\} + t < \min_{n \in N(t)} \{c_{fn}\} \quad (3.15)$$

したがって、(3.13)，(3.14)，(3.15)式から、

$$\min_{j \in S} \{c_{fj}\} + t < \min_{n \in N(t)} \{c_{fn}\} + \Delta d \quad (3.16)$$

$\Delta d$  が十分小さい場合には、

$$\min_{j \in S} \{c_{fj}\} + t \leq \min_{n \in N(t)} \{c_{fn}\} \quad (3.17)$$

が成立する。この場合、提案方法の故障原因候補は必ず従来方法の故障原因候補に含まれることになるから、提案方法の診断精度は従来方法より優ると言える。したがって、提案方法は故障影響波及時間の最大値と最小値の差が小さい場合に適している。



### 3. 5 結 言

大規模プラントを対象として、

- (1) センサからの異常情報を利用して故障原因候補を推定し、
  - (2) センサからの正常情報、隣接 2 機器間の故障影響波及確率、隣接 2 機器間の故障影響波及時間を利用して故障原因候補を絞り、
  - (3) 各機器の故障率、隣接 2 機器間の故障影響波及確率を用いて故障原因である可能性の順序付けを行なう、
- 故障原因推定法を提案した。

さらに、提案手法をセンサ故障を含む場合も扱えるように拡張した。拡張の方法として、センサ誤作動故障を故障の因果関係の論理モデルの一構成要素として取り込んだ。この方法は、提案手法をそのままモデルに適用できるため、機器故障とセンサ誤作動故障が同一レベルで統一的に扱える。センサ不作動故障については、推定した故障原因から異常を検出したセンサまでの故障影響波及時間と正常状態を示しているセンサまでの波及時間とを比較し、矛盾がある場合に、正常状態を示しているセンサを不作動故障であると推定することで処理する。本アプローチは故障影響波及時間という定量的関係を利用している点に特徴があり、従来方法よりもセンサ故障の推定能力に関して優ることを示した。

さらに、ある要素が故障原因である場合に予想されるセンサが示す正常や異常の出力パターンを生成し、実際のパターンと照合するというアプローチをとる故障原因推定法を提案した。本方法の特徴は、最初の異常検出時刻を基準にして診断開始時刻までの経過時間に応じたセンサ出力パターンを生成するところにある。本方法は、故障波及予測・診断システム実用化における課題を次のように解決するものである。

#### (1) 故障影響波及時間の誤差の問題

故障影響波及モデルに最大値と最小値を与え、生成するセンサ出力パターンに不確定部分の存在を認める。

#### (2) センサ故障仮定基準の問題

機器の故障確率より大きい発生確率を持つセンサ故障だけを仮定する。

## 第4章 原子力発電支援システムへの適用

### 4. 1 緒言

プラントの安全性、信頼性を向上させるために人間を支援する方法は大きく二つに分けることができる。一つは、設計時にプラントの信頼性解析や故障影響波及予測シミュレーション<sup>25,26)</sup>を行なうことによって二重化などの予防保全設計を行ないやすくする方法である。いま一つは、運用時に運転員や保全員に故障原因、故障影響波及の範囲、対策のためのガイド<sup>38-41)</sup>などを提供し、適切かつ迅速な対応を行ないやすくする方法である。本章では後者の方法を対象とする。

日本では、昭和55年より5年にわたって通商産業省補助事業原子力発電支援システム<sup>38)</sup>「インストラクションシステム」の開発が進められた。インストラクションシステムは、プラントの起動・停止時、通常運転時、異常時、事故時の4つの運転モードを対象としたプラント運転ガイドシステム、プラント操作確認システム、プラント異常原因診断システムなどのサブシステムからなり、運転員の負荷を軽減させ、原子力発電所の稼働率を向上させるものである。

本章では、インストラクションシステムの一サブシステムである故障影響波及予測（第2章参照）と故障原因推定（第3章3.3節参照）を行なう故障波及予測・診断システムFPS（Failure Propagation Prediction and Source Detection System）の開発について述べる。故障影響波及予測は、中央操作室で異常が報知された場合、対策を行なわないとすれば、故障の影響は何分後にどの範囲まで及ぶかを予測するものである。運転員は、この結果から将来の状況を容易に知ることができ、現時点での対策をより適切なものにするための情報として利用できる。故障原因推定は、プラントで何らかの異常が発生し、その影響を受けた中央操作室のメータ、表示器、警報灯類が作動した場合、それらの情報から故障原因を推定し、運転員の迅速、適切な対策を支援するものである。

なお、第3章3.4節の故障原因推定法は、FPSの検証・評価において明らかになった実用化における課題（故障影響波及時間の誤差、センサ不作動故障仮定基準）を解決するために提案したものであり、インストラクションシステムには適用していない。

以下、4.2節ではインストラクションシステムについて、4.3節では故障波及予測・診断システムの原子力発電支援システムへの適用について述べる。

## 4. 2 インストラクションシステム

通商産業省補助事業原子力発電支援システム開発の一環として、昭和55年から5か年にわたって、原子力発電所の運転信頼性のなおいっそうの向上を目指してインストラクションシステムが<sup>38-41)</sup>開発された。インストラクションシステムは、機能的には、通常時に運転操作を支援する機能、プラントの健全性を確認する機能、また、異常時・事故時に異常を早期に検出し、対応処置の支援をする機能、プラントの安定停止を支援する機能があり、メディアデバイスを活用した最新のマンマシンインタフェースを通じて、速やかに、運転員の手を煩わすことなく的確に、運転員にこれらの支援データを<sup>47)</sup>提供できる。

以下では、インストラクションシステムについて説明する。

### 4. 2. 1 インストラクションシステムの機能

インストラクションシステムは図4. 1に示したサブシステムからなる。

インストラクションシステムの機能は、事故時と起動・停止時の機能とに分けることができる。

#### (1) 事故時の機能

事故時の機能は、早期に異常を検出し、原因及びその波及範囲を予測することにより、早期の対応処置を可能とし、事故の復旧、運転継続に資するための機能である。

##### (a) 事故予防ガイド

プラントに異常が発生し、その異常に適切な対応策が施され、異常の進展を防止あるいは代替システムの使用などにより、運転継続が可能となる場合もある。本システムでは、原子炉スクラムにいたる約200の事象を原因と結果を論理式で表現した原因結果関連樹木によるデータベースをもとに、異常、事故の波及防止を目的とした運転操作ガイドを提供する。当該事象が発生した場合は、その原因、波及予測、波及防止のための運転操作ガイドをCRT上にメッセージの形で表示し運転員を支援する。

##### (b) 故障波及予測・診断システム

事故予防ガイドでは、上述したように原子炉トリップにいたる重要事象を中心に取扱うが、更に、詳細な故障診断・波及予測を実施するために本システムを導入した。

本システムに関しては次節で詳述する。

##### (c) 小LOCA検出診断システム

原子炉水位・圧力などのパラメータの雑音特性が事故前後で変化することを利用して観測値と予測値の差から異常を検出する。異常が検出されるとあらかじめ設定した小LOCA (Loss of Coolant Accident: 冷却材喪失) 発生時の原子炉圧力、水位など複数個のパラメータの変化パターンに、実際に発生した異常時のパターンがどれだけ近いかを評価して、小LOCAの大きさなどを推定する。

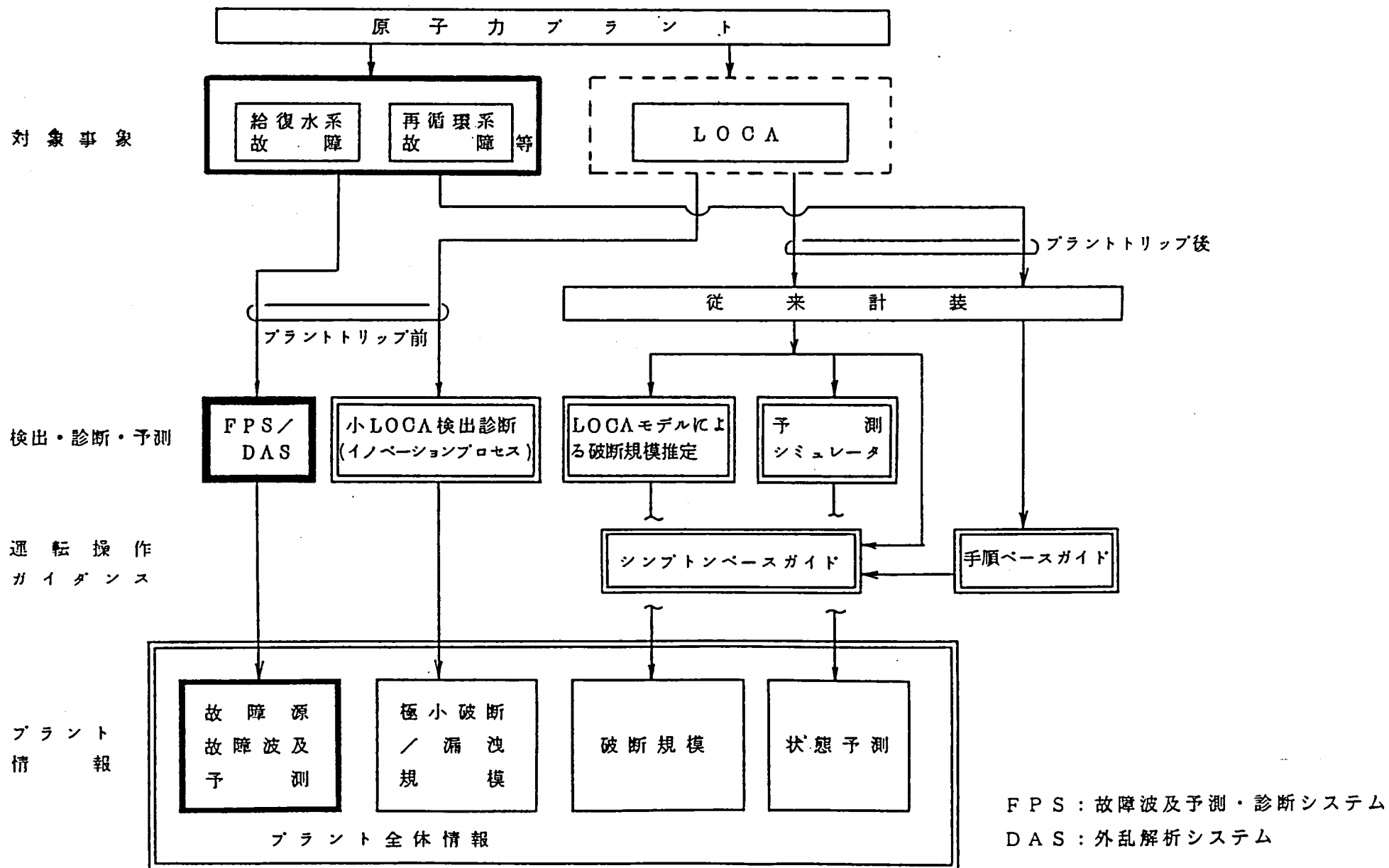


図 4. 1 インストラクションシステムの機能構成

#### (d) 高速予測シミュレータ

事故発生後の原子炉水位・圧力の変化率をもとに破断口の大きさを推定し、それをもとに、原子炉水位、圧力、格納容器圧力の将来値を予測する。

#### (e) 事故時ガイド

事故時ガイドは、前述のような診断・予測機能があっても、プラントがトリップした後の、運転操作に対する指針を与える機能と位置付ける。通常のプラントトリップの場合、各プラントで規定されている事故時運転操作手順に基づいて、プラント状況を詳細に判断して、当該事象を収束させるのに必要十分な系統の運転操作手順をCRT表示し運転員を支援する（手順ベースガイド）。冷却材喪失の場合、原子炉の水位・圧力や格納容器圧力などの安全上重要なパラメータが変化して、安全限界に近づいていることを示す指標（兆候）に基づいた運転操作ガイドをCRT表示する（兆候ベースガイド）。

#### (2) 起動・停止時の機能

起動・停止時の機能は、通常運転の支援及び異常・事故発生時使用する系統の健全性の確認である。

##### (a) 運転制限モニタ

本モニタは、安全運転のための各種遵守事項が確実に守られているか否かを判断確認する機能を持つ。

##### (b) 系統状態評価モニタ

本モニタは、発電所の状態に応じて要求される各種安全系がいつでも起動可能な状態になっていることを確認するものである。

### 4. 2. 2 検証評価

検証試験としては、総合組合せ試験及び実用性評価試験の二つを実施した。総合組合せ試験では、プラントシミュレータを使って各種の機能が所定の仕様通り動作するか否かに着目して試験を実施し、その性能を確認した。実用性評価試験は、インストラクションシステムの仕様自体の有効性を評価することを目的としたものであり、インストラクションシステムを使用した場合と、しない場合の運転操作上発生する相違を評価した。

#### (1) シミュレーション結果

インストラクションシステムを使用したときのシミュレーション結果の例を図4. 2に示す。このシミュレーションでは、タービン補機冷却水系（TCW）の熱交換器の故障により原子炉トリップにいたる場合である。このようなトランジェントが発生すると、次のようにインストラクションシステムは運転員を支援する。最初TCW熱交換器出口温度高で故障波及予測・診断システムが動作し、時間の経過と共に、故障原因を推定し、TCWの熱交換器が故障していることを推定する。その結果、手動により原子炉出力を低下させ運転継続を図る。しかし、故障が進展して、固定子冷却水喪失により故障発生後数分で発電トリップにいたる。これと同時に手順ベースガイドにより、原子炉手動スクラム及びスクラムの後の基本操作がガイドされ、それに基づいて運転員は操作・確認を行なうことに

なる。このように、インストラクションシステムは、プラントの全運転状態を通じて運転員を支援している。

## （２）試験結果

図４．２に示すような予め定めたシミュレーションに対し、プラント運転要領所に基づいて作成した標準的な運転操作手順と実際に実施した運転操作とを対比させた。その結果、スクラム後の基本操作に対しては、インストラクションシステムを使用したときとしないときでは差異は認められなかったが、判断を伴う運転操作、予防的な運転操作にたいしては、インストラクションシステム使用時はより標準運転操作手順に近づき、インストラクションシステムの効果が認められた。運転員負担軽減に対しては、異常検出原因調査に対する時間短縮が図られることが認められた。

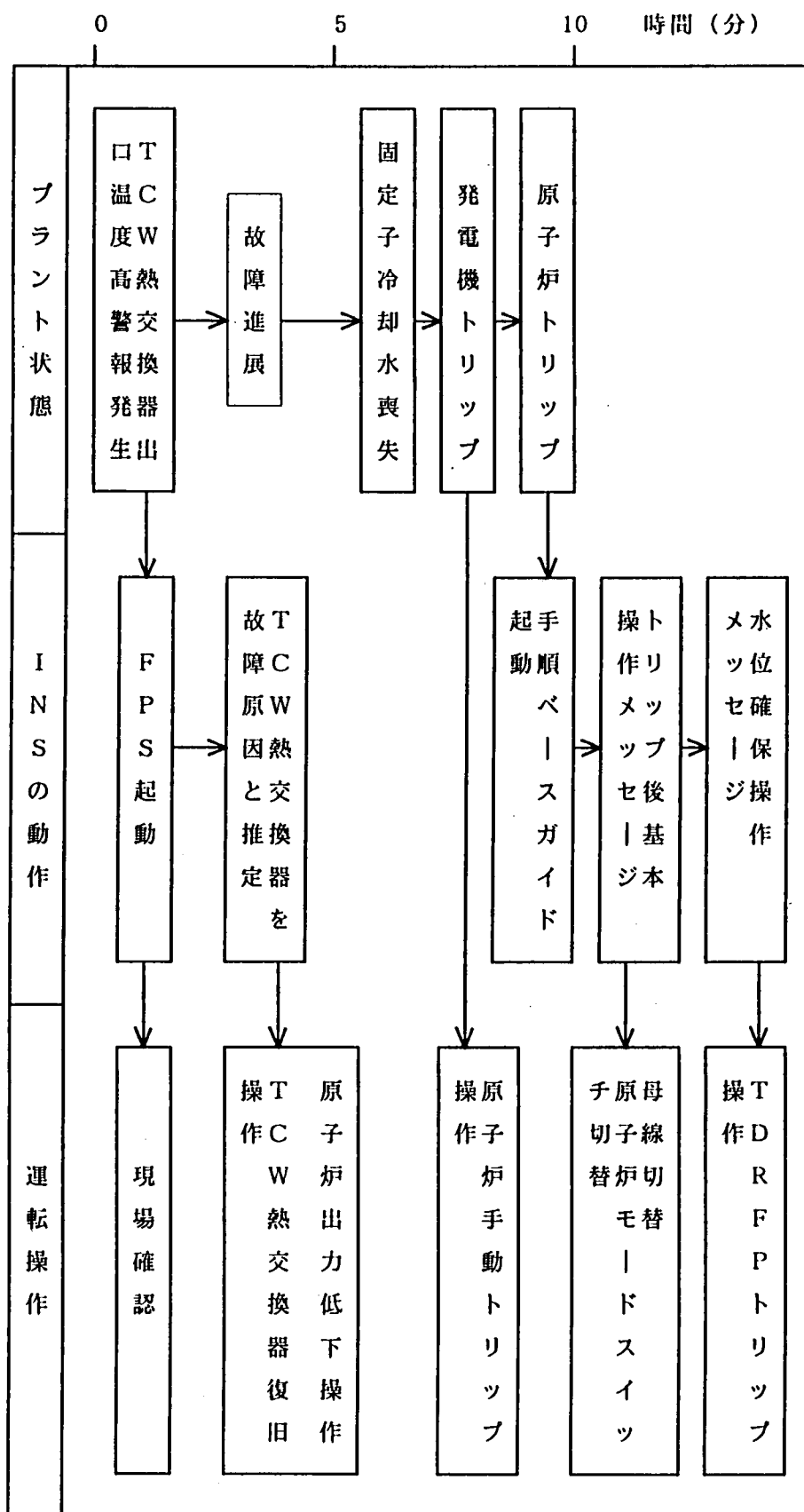


図4. 2 インストラクションシステム (INS) の動作例<sup>38)</sup>

## 4. 3 故障波及予測・診断システム

故障波及予測・診断システム（以下、FPSと略記する）は、故障影響波及関係のネットワーク構造データを初期データとして記憶し、プラントから異常信号が入力されると故障原因の推定及び故障影響波及範囲の予測を行なう。運転員は画面の選択や予測時間などの条件変更を行ないながら推定、予測結果の情報を入手し、適切な対策を行なうことができる。

FPSは前節で述べたインストラクションシステムの一サブシステムであり、図4. 1に太枠で示した機能を分担している。

### 4. 3. 1 システム構成

FPSは、図4. 3に示すように、プラントに設けたセンサからの信号を、演算処理の施しやすい0、1のデジタル信号に変換し、センサ状態テーブルを作成する入力信号処理部と、プラントに生じた異常を解析し、故障原因の推定と故障影響波及予測を行なう解析部、およびセンサ検出異常、推定故障原因、故障影響波及予測範囲を運転員の要求に従って表示する表示部より構成される。

以下に各部の機能、構成を示す。

#### （1）入力信号処理部

プラントに設けたセンサからのプロセス流量、弁開閉状態、制御器異常等の情報を、アナログ信号については設定値により、デジタル信号については信号の状態により判定し、周期的にセンサ状態テーブルに入力し、データの更新を行なう。

#### （a）センサ状態監視アルゴリズム

センサデータに異常信号が含まれる場合に単純に解析プログラムを起動すると、異常が回復方向にある場合にも、解析が実施されることになり、運転員を混乱させる恐れがある。また、解析アルゴリズムでは、異常から正常に戻った信号も異常として扱わなければならない（第3章を参照のこと）。そのため、センサ状態テーブルには取り込んだセンサデータの判定結果をそのまま設定するのではなく、図4. 4に示すセンサ状態監視アルゴリズムにしたがった処理結果を設定する。

図4. 4の処理の特徴は次のとおりである。

- （i）センサの状態変化がすべて異常から正常への変化ならば、異常回復と判定する。
- （ii）異常から正常へ戻ったものも、センサ状態テーブルに記憶する。
- （iii）センサが状態変化した結果、すべての状態が正常になればセンサ状態テーブルを初期化する。



← 入力信号処理部 × 解析部 × 表示部 →

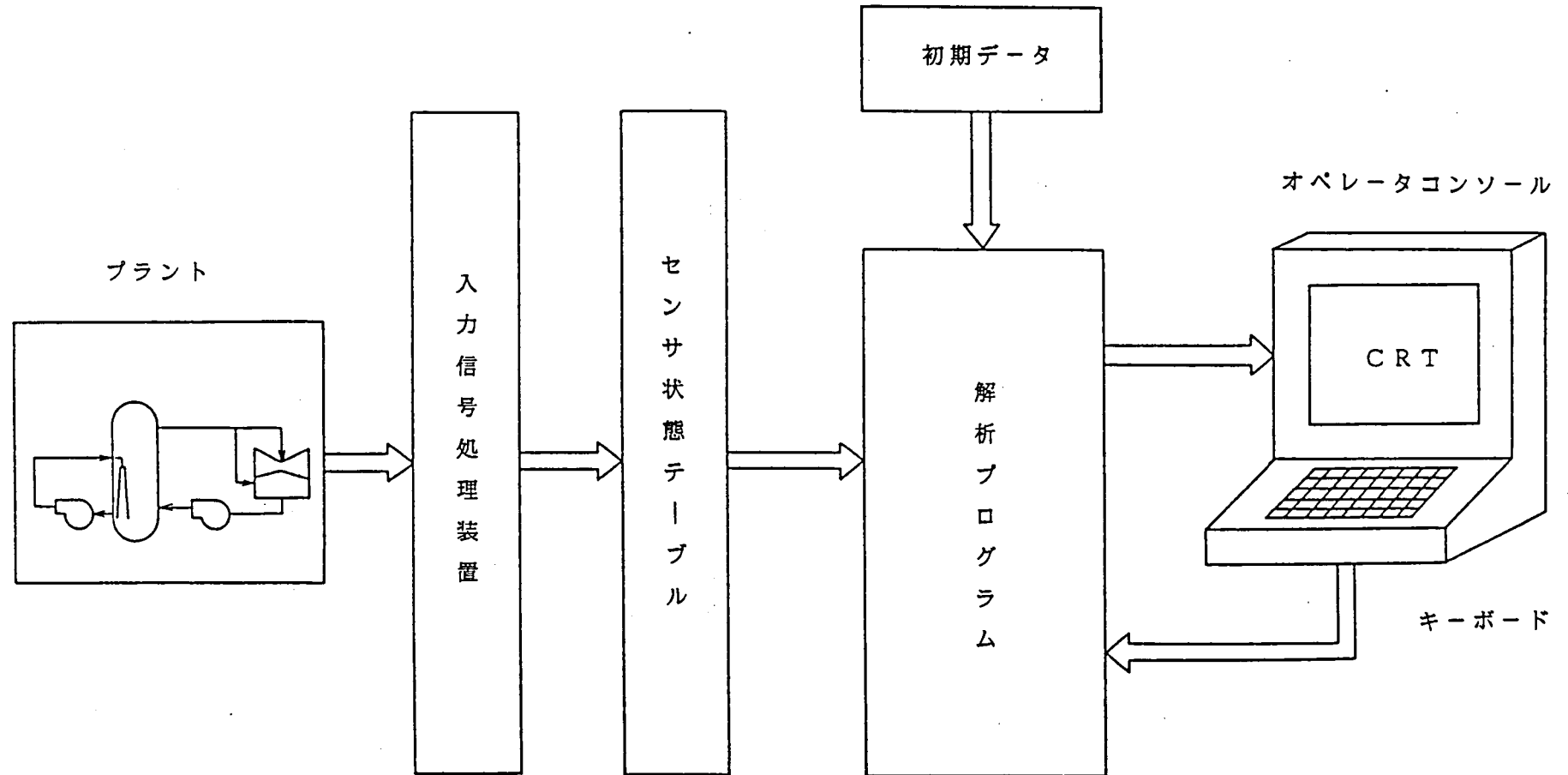


図 4. 3 故障波及予測・診断システムの構成

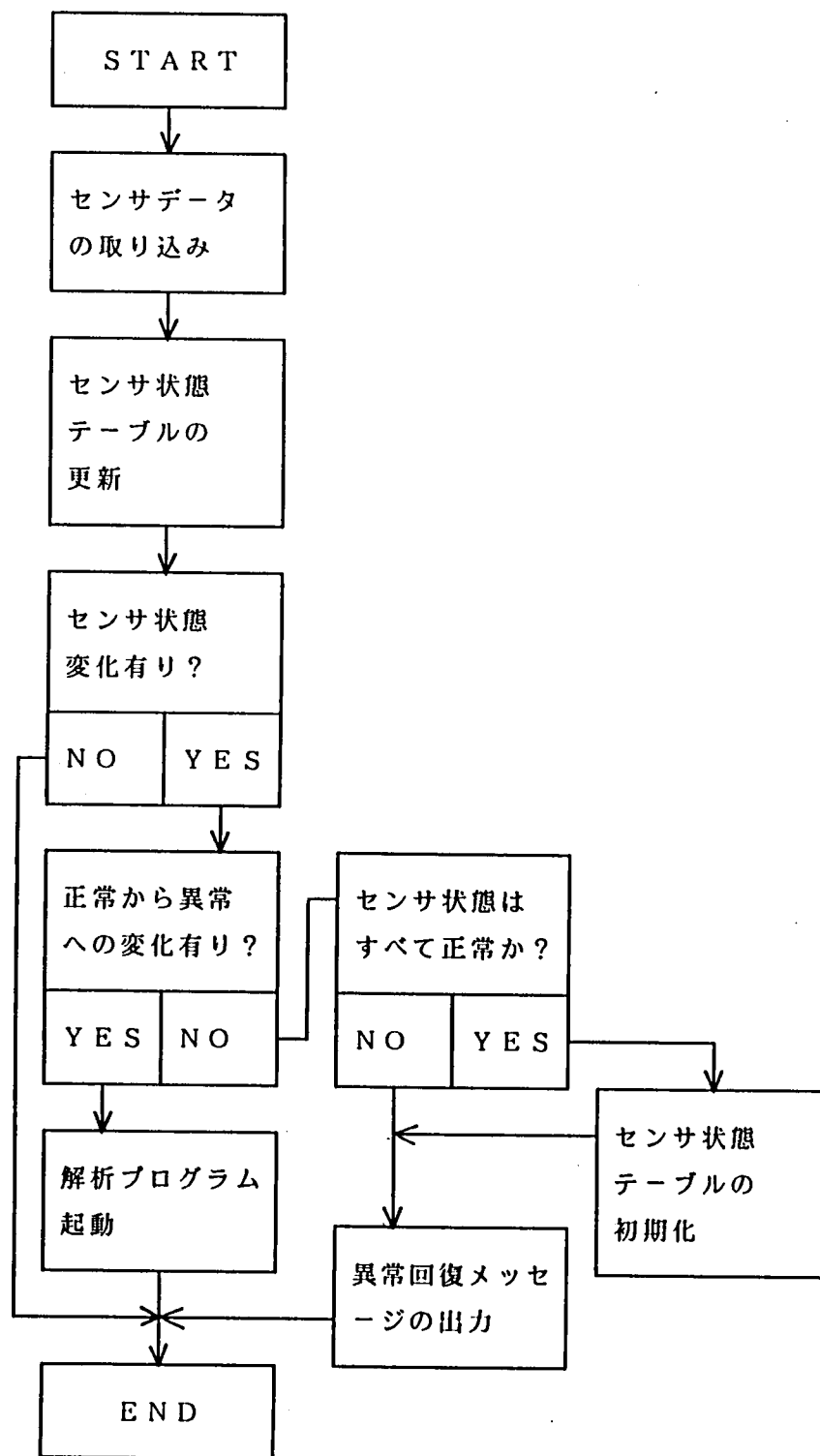


図4. 4 センサ状態監視アルゴリズム

図4. 4のセンサ状態テーブルを更新するステップでは、各センサについて今回取り込んだセンサデータと前回の判定結果を比較し、表4. 1に示す更新規則に従って判定結果と異常検出時刻を更新する。なお、表4. 1のケース2、3または6のいずれかの場合の更新があれば正常から異常への変化ありと判定する。また、今回のデータがすべて0であればセンサ状態はすべて正常と判定する。

表4. 1 センサ状態テーブルの更新規則

ケース	前回の判定結果	今回のデータ	今回の判定結果	異常検出時刻
1	0	0	0	0
2	0	1	1	今回の時刻
3	1	0	-1	前回の時刻
4	1	1	1	前回の時刻
5	-1	0	-1	前回の時刻
6	-1	1	1	前回の時刻

0 : 正常

1 : 異常または正常から異常へ変化

-1 : 異常から正常へ変化

## (2) 解析部

解析部には、予めオフラインデータとして、プラント構成機器の故障形態（ポンプ電源故障、弁位置異常等）の発生率（故障率）、故障形態間の故障影響波及関係（故障影響波及方向、波及時間、波及確率）などの初期データ（解析モデルデータ）が入力されている。入力信号処理部より、センサ状態、異常検出時刻の入力があると、初期データに基づいて故障原因推定、故障影響波及予測を行なう。このときの故障影響波及予測時間は、運転員の要求がある場合には、故障影響波及予測時間選択画面から運転員が選択し、要求がない場合には、自動的にデフォルト値が選択される。

また、故障原因推定と故障影響波及予測アルゴリズムの利用形態には次の2つの方法がある。

(a) センサ情報をもとに故障原因推定と故障影響波及予測を独立に行なう。

(b) まず故障原因推定を行ない、次にその推定故障原因候補からの故障影響波及予測を

行なう。

(a) は、センサ情報に基づいて推定と予測を独立に行なうため、予測結果は (b) よりも安全側の評価となる。その反面、推定結果と予測結果との間に矛盾が生じる場合がある。すなわち、推定した故障原因が正しいとした場合、ありえない個所を故障影響波及範囲として予測する場合がある。これは独立に推定と予測をするために避けられないものである。

(b) は、推定故障原因から故障影響波及予測を行なうために、推定結果と予測結果との間には矛盾が生じない。しかし、(b) では、多重故障の発生などにより、故障原因の推定が不可能な場合には故障影響波及予測も行なえない。そこで、故障原因を推定できる場合は (b) を、推定できない場合は (a) により故障影響波及予測のみを行なう。

たとえば、図 4. 5 に示す故障影響波及網において、センサノード 5 が異常を示す場合について考える。故障原因候補がノード 3、7 と推定された場合には、故障影響波及範囲は 1、3、5、7 と予測する。故障原因候補が求まらない場合には、異常を示しているセンサノード 5 に対応したノード 2、3 を故障原因とみなして予測を行なう。

### (3) 表示部

表示部からの出力情報を以下に示す。

- (a) センサ状態 (異常検出個所の系統図表示)
- (b) 異常検出時刻
- (c) 解析開始時刻
- (d) 故障影響波及予測時刻
- (e) 故障影響波及予測範囲
- (f) 故障原因候補
- (g) 故障原因候補の優先順位

## 4. 3. 2 適用対象

F P S の適用対象として原子力プラントの主要系統である再循環系と給復水系を選定した。

### (1) 適用系統の選択基準

F P S を原子力発電プラントの全系統に対して適用することも可能であるが、本研究では開発コストを低減し、F P S の有効利用を図るために、以下の選択基準を設けて系統の選択を行なった。

#### (a) 異常発生により、プラントの運転に重大な影響を与える系統

原子力発電プラントでは信頼性確保のために、同じ機能を果たす系統を複数個設けている場合があり、このような系統では、故障が発生した場合、F P S の情報をもとに系統の健全性を守るより、他の系統によって代行させた方がプラント全体の信頼性、稼働率の向上に有効である。したがって、F P S を適用する系統は、他の系統による代行が困難であり、かつその系統の故障によってプラントの運転に明確な支障をきたす系統である必要がある。

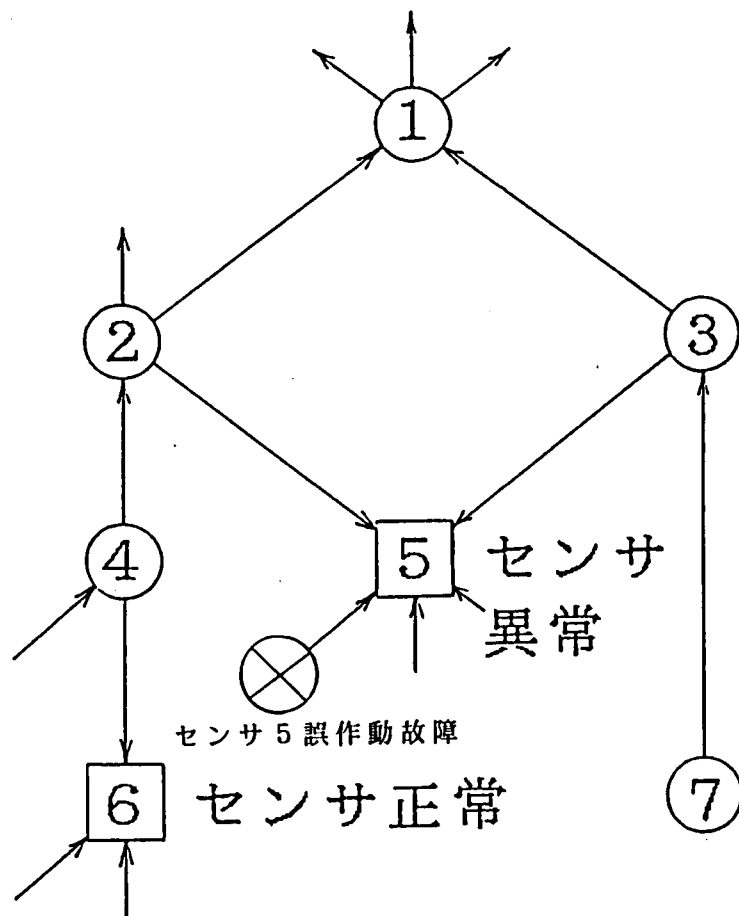


図4.5 故障影響波及網の例

(b) 故障発生からプラントトリップまでに、十分な時間を要する故障影響波及関係を多く含む系統

故障発生時に、プラント運転員がF P Sの情報をもとに適切な処置を施すためには、その間の時間が故障影響波及時間より短くなくてはならない。したがって、F P Sを適用する系統の故障影響波及時間には、この条件を満足する波及関係を多く含む必要がある。

(c) 多くの原子力発電プラントにおいて共通に存在する系統

F P Sのプラント模擬データ作成労力の効率化を図るため、多くのプラントに共通な系統を対象としてモデリングを行ない、開発コストを低減させる必要がある。

(d) 原子力プラントシミュレータにより、故障の模擬が容易な系統

F P Sの検証に、実プラントを用いることは実質的に不可能であるため、その検証は、原子力プラントシミュレータによって行なう。したがって、F P Sを適用する系統はシミュレータによる故障の模擬が容易でなくてはならない。

以上の基準に基づきF P S適用系統として、原子力発電プラント再循環系、給復水系を選択した。

次に各系統の機能を簡単に説明する。

(a) 再循環系

再循環系は、原子炉压力容器の外部にそれぞれ1台の再循環ポンプを有する2つのループで構成されている。本系統は通常運転時に炉心に十分な流量の冷却材を再循環する能力、及び炉心の冷却材流量を調整し、原子炉出力を制御する能力を持つ。

(b) 給復水系(給水・復水・復水浄化系)

原子炉保有水を維持し、高圧で大量の脱塩水を供給するために、次のような機能を有す。原子炉で発生した蒸気は、主蒸気管を経てタービンを回し、タービン蒸気として復水器に導かれる。復水器により凝縮されたタービン蒸気は、復水浄化ポンプで昇圧された後、復水浄化装置により原子炉給水として十分な水質に処理され、復水器に戻される。この後、復水ポンプによる昇圧、及び給水加熱器による加熱が行なわれ、給水ポンプを経て原子炉压力容器内の冷却水として供給される。原子炉の水位制御は、原子炉水位、主蒸気流量及び給水流量の三要素制御方式により行なわれる。

(2) 故障影響波及モデル

作成したデータの種類とその作成方法を示す。

(a) 故障形態の発生率(故障率)

原子力プラントに関するIEEE - s t d 5 0 0<sup>32)</sup>をもとに決定し、単位は、  
[ $\times 10^{-6}$  回/h r] に統一した。

(b) 測定器の故障率(誤信号の確率)

測定器自身と、接点、発信器のハードウェア故障と、信号伝送エラーや設定値の誤差によるソフトウェア的な故障を対象とした。ただし、設定値の誤差によって発生する誤信号の確率は、決定が困難なため、制御系の故障率で代用した。

(c) 故障形態間の波及関係

主にフォルトツリーをもとにAND、ORの波及関係で表現し、プラント保護インターロックや、制御系の動作など、波及関係の明確なものから決定した。

#### (d) 故障影響波及時間

故障影響波及媒体（冷却材の圧力、流量など）の単位長さ当たりの伝播時間と故障影響波及経路の長さとの積によって決定した。

#### (e) 故障影響波及確率

確率的な波及現象は無視できると考え、モデル化しなかった。また、AND故障要素へ故障影響が波及するセンサ要素の情報はすべてオンライン入力されるため波及確率を用いたモデル化は不要であった。

### 4. 3. 3 計算時間評価

原子力発電プラントを適用対象としたFPSは、オンラインで使用されるため、計算時間を測定して実用性の評価を行なう必要がある。しかしながら、対象とする系の初期データは約200種類の測定情報を入力しており、任意に擬似故障状態信号を作成した場合、その組合せは $2^{200}$ にも及んでしまう。また、各擬似故障状態信号は、実際の故障状態と同様にシーケンシャルに入力させる必要があり、故障影響の波及時間の違いまで考慮するとその数は膨大な量になってしまう。そこで、実際のプラントで発生しうる故障であり、なおかつFPSの有効性を明確に表す擬似故障状態信号を作成して、計算時間を評価する。

#### (1) 擬似故障状態信号の作成

FPSの有効性を明確にするため、擬似故障状態信号の作成基準を以下のように定め、その基準を満足すると考えられる、計62ケースの擬似故障状態信号を作成した。

(a) 故障発生時に、FPSの出力情報がなければ、故障影響の波及範囲を予測することや、故障原因の推定を行なうことが運転員には難しいこと。

(b) 上記(a)において、FPSの出力情報をもとに運転員が対応操作を実施するまでの時間より、故障影響波及の進展速度が速く、短時間でスクラム、または最終的な故障状態に到達してしまう場合は省く。

(c) 上記(a)において、FPSの出力情報をもとに運転員が対応操作を実施しようとしても、対象としているプラントに必要な機能が存在していない場合は省く。

#### (2) 結果の検討

作成した擬似故障状態信号62ケースより、最も特徴的なものを20ケース抽出し、HITAC M-180計算機を用いて計算時間を測定した。その結果、図4.6に示すように、計算時間は、平均：0.46±0.23秒、最大：1.8秒となり、オンラインシステムとしての予測・推定計算が可能であることを確認した。

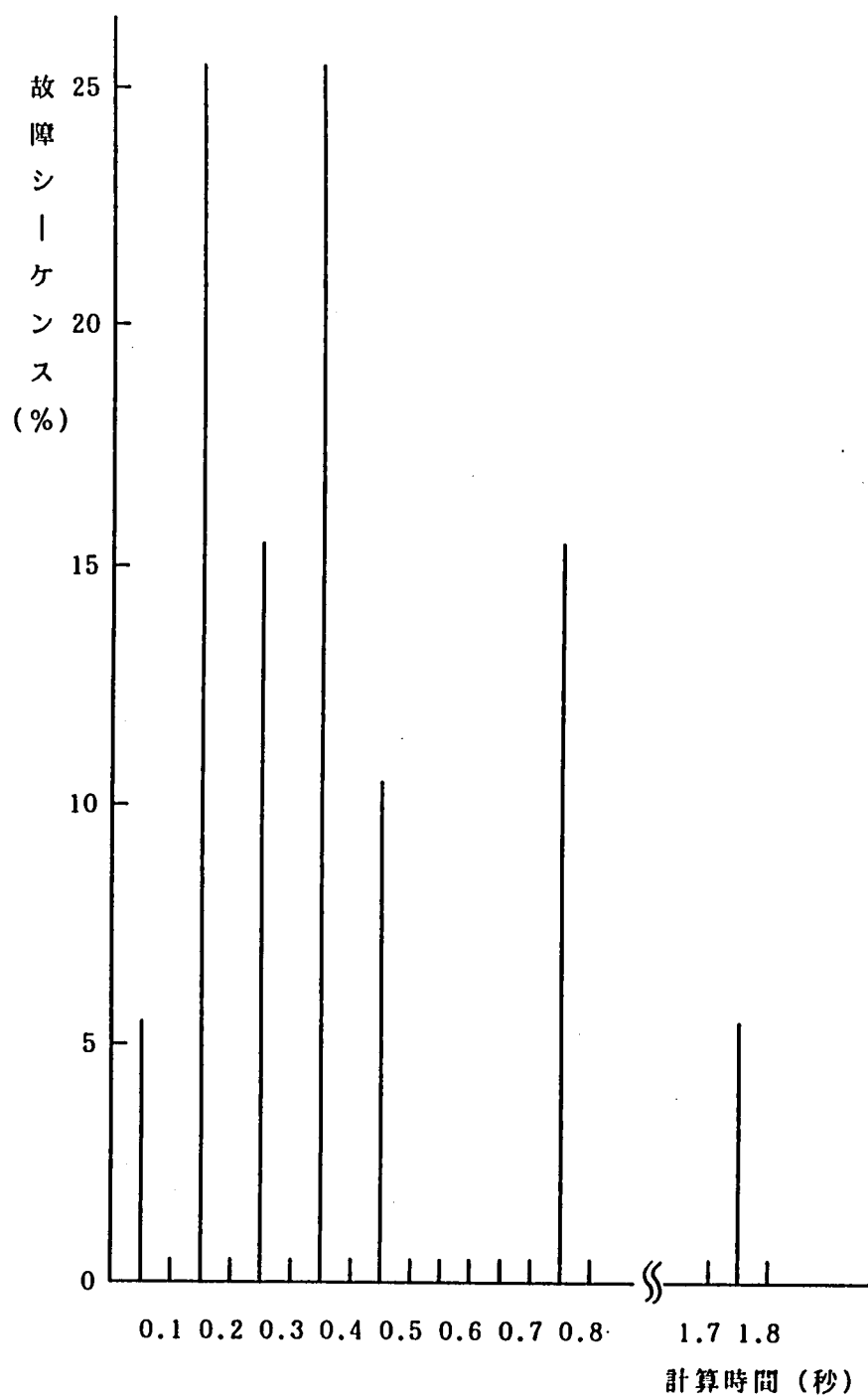


図4. 6 FPS計算時間の分布



## 4 . 4 結 言

プラント異常発生時に故障原因の推定と故障影響波及範囲を予測することにより運転員を支援する故障波及予測・診断システム（FPS）を開発した。以下の課題について検討した。

### （１）入力信号のトランジェントな変動への対応

一度異常になったものはシステムが正常に復帰するまでは異常として扱う信号前処理アルゴリズムを開発した。

### （２）効果的適用対象

故障発生時の影響の度合いなど適用対象選択基準を設けて、原子力プラントの各種系統を評価し、FPSの効果が顕著に表われる再循環系と給復水系を選定した。

### （３）演算時間の十分性

作成した故障影響波及モデルをもとにFPSで故障原因推定と故障影響波及予測を行なった場合、演算時間がオンラインシステムとして十分であることを確認した。

### （４）インストラクションシステムのサブシステムとしての有効性

検証試験の結果確認した。

## 第5章 予防保全設計への適用

### 5. 1 緒言

プラントの安全性、信頼性を向上させる方法は、設計段階で対策を講じておく方法—予防保全設計—と運用段階で復旧、系統切替などを行う方法に大別できる。第4章では後者の方法を対象とした。本章では前者の方法を対象とする。

本章では、故障影響波及範囲予測法（第2章）と故障原因推定法（3.2節）の予防保全設計への適用について述べる。故障影響波及範囲予測法により、ある故障が発生した場合、対策を施さなければ、何時間後にどの範囲までその影響が広がるかを予測する。この結果から、短時間に広い範囲に故障の影響が波及する機器は、より高い信頼性を持つ機器に交換する、重要な系統へ波及する場合には保護装置やバイパスを設置する、極めて短時間に波及する系統は自動切替にするなど、予防保全設計が可能となる。故障原因推定法により、プラントで何らかの異常が発生し、中央操作室のメータ、表示器、警報灯類が作動した場合に、真の故障原因を同定できるか否か、ひいては迅速・適切な対策を施せるか否かを設計時に確認できる。適用例としては、大規模プラントの1つである脱石油エネルギープラントを取り上げ、プラントの安全性を評価する。

一方、第4章で述べた故障波及予測・診断システムを実用化するためには、設計段階においてセンサの最適配置や診断精度の事前評価を行う必要がある。プラントではセンサの配置は物理的、経済的制約から決まる場合も多い。そこで本章では、センサの配置が与えられた場合の診断精度の評価問題を取り上げる。診断精度（診断の結果得られる故障原因候補集合の中で最大のものの大きさ）の事前評価に関する研究には、符号付有向グラフを用いた故障診断法を対象としたものがある<sup>36)</sup>。しかし、この研究では診断する時刻が診断精度に与える影響が検討されていない。また、故障原因推定法の予防保全設計への適用では、重要な故障原因について事故シーケンスのシナリオを作成し、そのシナリオから予想されるセンサ出力パターンに対する故障原因推定結果について評価した。したがって、対象モデルが大きいと種々のセンサ出力パターンを想定しなければならず、診断精度の事前評価という観点からは十分な評価は困難と言える。

そこで、本章では、ある要素が故障原因である場合に与えられた診断時刻に予想されるセンサの出力パターンを生成し、他の故障原因によるパターンと一致するかどうかを調べることにより、診断時に故障原因候補数を何個まで絞ることができるかを評価するアプローチを提案する。

以下、5.2節では火力発電プラント用液化石油ガス気化設備への適用について、5.3節では冷熱発電プラントへの適用について、5.4節では原子力プラント再循環系への適用について、5.5節では診断精度の事前評価法について示す。

## 5. 2 火力発電プラント用 液化石油ガス気化設備への適用

火力発電プラント用液化石油ガス（LPG）設備は、低温常圧型LPG専用タンカーにより輸送されるLPGを荷揚げし、低温タンクへ受け入れ、貯蔵し、発電用ボイラー燃料に供するために気化し、払い出しする機能を持つ設備である。LPG設備の主要サブシステムである気化設備には、プロパン用とブタン用の2系統がある。この設備の機能は、タンクの液化プロパンをポンプにより、プロパン蒸発ドラムに送り、リボイラで加熱、気化し、スーパーヒータでさらに加熱し、同様に気化したブタンガスと混合してボイラへ送るものである。

### 5. 2. 1 故障影響波及範囲予測法の適用

適用対象とした気化設備の構成機器数は59、各機器の故障形態を考慮すると故障要素数は122である。センサによる検出可能故障形態はタンク遮断弁作動不良（故障要素番号1-1）、ポンプのベアリング摩耗（3-1）など34点である。

適用に当たっては、故障発生後の経過時間を、故障対策や影響波及防止の面から重要な時間と言われている3分とし、安全性の検討を行うこととした。

気化設備の安全性・信頼性を故障影響波及範囲の広さから検討した。故障影響波及時間が短く、波及範囲が広いものが、故障対策や波及防止の面から重要な要素と言える。故障発生後、3分時点で故障影響波及経路が5本以上となる故障要素を選び、さらに故障率が小さく無視できると考えられるものを除くと、ガス流量発信器作動不良が残った。以上から、気化設備の予防保全設計に当たっての留意点はガス流量発信器作動不良であることが明らかとなり、より信頼性の高い機器の使用や2重化が必要と分かる。

### 5. 2. 2 故障原因推定法の適用

#### （1）適用結果

適用に当り、想定した主な異常現象を以下に示す。なお、故障原因推定開始時刻はすべて12時0分とした。

＜ケース1＞ ポンプのキャビテーション（3-4）が故障原因となり、吐出圧力が低下して運転停止した場合で、センサはポンプ停止（3-6）を12時0分に検出。

＜ケース2＞ 温水流量不足（該当する故障要素番号無し）が故障原因となり、蒸発ドラム入口遮断弁が閉（22-2）、全系運転停止の場合、センサは、温水入口遮断弁異常作動閉（47-1）を11時29分に、ボイラ圧力低下（54-2）を11時40分に、蒸発ドラム液温度低下（26-4）を12時0分に検出。

＜ケース3＞ ガス遮断弁作動不良（46-1）が故障原因となり、ボイラ側のガス供給圧力が低下（54-2）した場合、センサはガス遮断弁作動不良（46-1）を11時5

0 分に、ボイラ圧力低下（54－2）を12時0分に検出。

＜ケース1＞の異常検出状態に提案手法を適用した結果を表5. 1と図5. 1に示す。図5. 1は推定故障原因、正常状態表示センサ、異常状態表示センサを気化設備の故障影響波及網上に示したものである。

＜ケース2＞の推定故障原因は無し。

＜ケース3＞の推定故障原因はガス遮断弁作動不良のみとなった。

## （2）結果の検討

＜ケース1＞については、表5. 1に示すように、真の故障原因であるポンプキャビテーションが故障原因候補の第2位に順位付けられており、妥当な結果と言える。候補数が多い理由としては、異常検出ノード数が1個と少ないことが上げられる。候補数を絞る方法としては、候補に上げられていて、かつセンサが設置されていないノードにセンサを設置する。時間の経過を待つて、異常検出ノード数が増えてから、故障原因推定を行なうなどが考えられる。

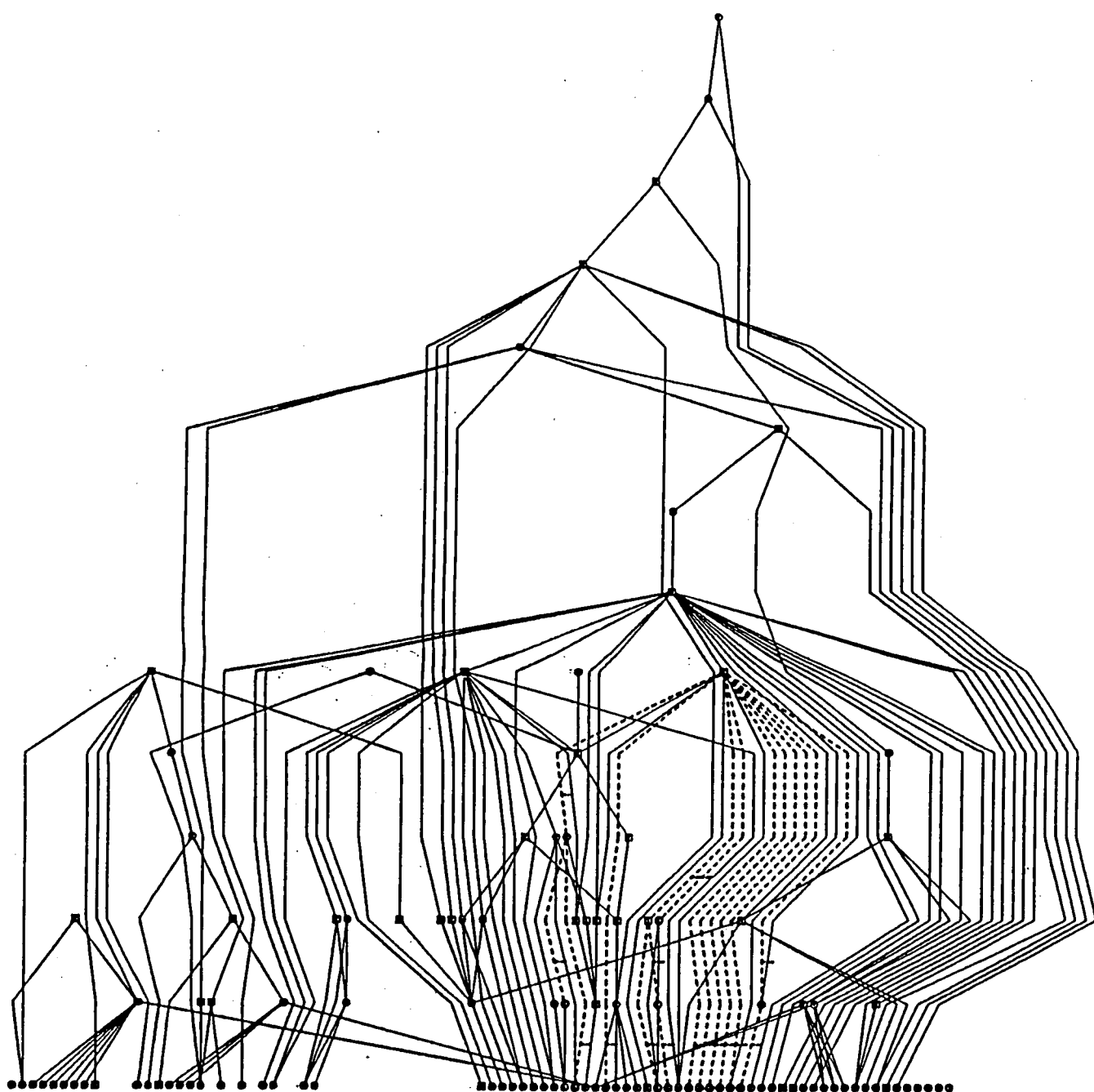
＜ケース2＞は、解がない（真の故障原因である温水流量不足というノードはない）場合の問題を設定して適用した結果であり、予想通り候補は上げられていない。

＜ケース3＞では、真の故障原因のみを候補に上げており、正解と言える。

以上のことから、提案手法により求めた故障原因候補は妥当なものであると考えられる。また、＜ケース1＞のようにして、センサを設置すべき個所を知ることができる。

表5. 1 液化石油ガス気化設備の推定故障原因リスト

順位	故障原因候補名	故障要素番号
1	ポンプ停止	3－6
2	ポンプキャビテーション	3－4
3	ポンプコイル絶縁不良	3－2
4	流量発信器作動不良	10－1
4	ポンプインペラ－エロージョン	3－3
6	ミニマムフロー調整弁作動不良	11－1
6	流量発信器つまり	10－2
6	レベルスイッチL故障	4－0
9	ポンプ異物混入	3－5
10	ストレーナつまり	2－1
11	圧力スイッチH故障	8－0
11	圧力スイッチLL故障	6－0
13	温度検出器故障	5－0
14	ストレーナ作動不良	2－3
15	ストレーナ破損	2－2
16	タンク遮断弁つまり	1－2



-----: 故障波及経路

図 5. 1 液化石油ガスプラント気化設備の故障影響波及網における推定故障原因

## 5. 3 冷熱発電プラントへの適用

液化天然ガスLNGは、近年、脱石油推進の一つの柱として、需要が急増している。これに歩を合わせ、LNGの冷熱を有効利用する冷熱発電プラントの建設も増加してきている。冷熱発電は、海水などの温熱源から受熱し、冷熱源に放熱する熱サイクルにより発電<sup>48)</sup>を行なうものであり、サイクル媒体の圧縮動力と膨張動力の差が有効出力として得られる。冷熱発電は、火力発電所などの負荷変動や大容量のLNG流量に対応させることができる点で、極めて有効な冷熱利用方法であると考えられるが、同時に火力発電所用燃料の気化設備であるという観点から信頼性・安全性が強く要求されるものでもある。

### 5. 3. 1 故障影響波及範囲予測法の適用

適用対象とした冷熱発電プラントの構成要素数はポンプ、タービンなど56、各機器の故障形態を考慮すると故障要素数は129である。これは、5.2節で示した液化石油ガス気化設備とほぼ同程度の数である。また、センサの検出可能故障形態は、昇圧ポンプ異常振動、母管圧力低など87個所である。

5.2.1項と同様の検討を行い、特に問題がないことを確認できた。しかし、この検討過程において、波及が考えられない個所への波及や、逆に波及すべき個所への未波及を発見し、この結果、波及経路の追加、削除、変更など14点について当初作成したモデルを改善できた。

これは、故障影響波及範囲予測法が故障影響波及モデルのブラッシュアップにも有効であることを示している。

### 5. 3. 2 故障原因推定法の適用

#### (1) 適用結果

故障原因推定法の適用に当っては、根源的な故障原因、すなわち他の故障も根源故障の波及の途中結果であると考えられる故障原因を12項目選出し、その影響の波及によって、複数個のセンサで異常が検出された場合の12ケースを想定した。

適用結果の一部を表5.2、図5.2に示す。表5.2は、故障原因、波及現象、異常検出状況、提案手法による故障原因推定結果をまとめたものの一例である。

図5.2は、ストレーナがつまった場合(表5.2)の故障原因推定結果を、対象プラントの構成機器の故障形態間での波及関係をグラフ表示した図(故障影響波及網)の上に故障原因推定結果を示したものである。この図から、故障原因推定の模様を確認できる。

さらに、残りの11ケースについても同様に故障原因を想定し、各ケースごとに表5.2に示すようなセンサ異常検出時刻を与えた。適用結果を表5.3に示す。表中第1列は、想定した故障原因(12ケース)、第2列は、故障原因推定を行なった結果、想定故障原因が候補中の第何位に順位付けられたかを示す値、第3列は故障原因候補として推定され

た故障要素の数である。

(2) 結果の検討

表5. 3から、推定結果が正解のみのものが9ケース、正解を第1の故障原因候補にあげ、他に1つの候補をあげているものが3ケースあることがわかる。

この結果から、対象とした冷熱発電プラントは、異常が検出されても故障原因の同定を十分行なえることが明らかになった。

表5. 2 冷熱発電プラントへの適用結果

現象	
(1) 昇圧ポンプサクションストレーナに異物がつまる	
(2) ポンプ出力流量低下	
(3) ポンプ停止	
(4) 送液量低下	
(5) 気化量不足	
(6) 送気母管圧力低下	
(7) タービン停止	
異常検出状況	
異常検出時刻	異常形態
1 : 0 : 1 0	昇圧ポンプ異常振動
1 : 0 : 2 1	昇圧ポンプ出口流量低トリップ
1 : 0 : 2 1	昇圧ポンプ停止
1 : 2 : 3 1	タービン排気圧力極低
1 : 2 : 3 2	タービン停止
1 : 3 : 0 0	昇圧ポンプ異常温度上昇
推定結果	
順位	故障原因候補
1	昇圧ポンプサクションストレーナ異常閉塞

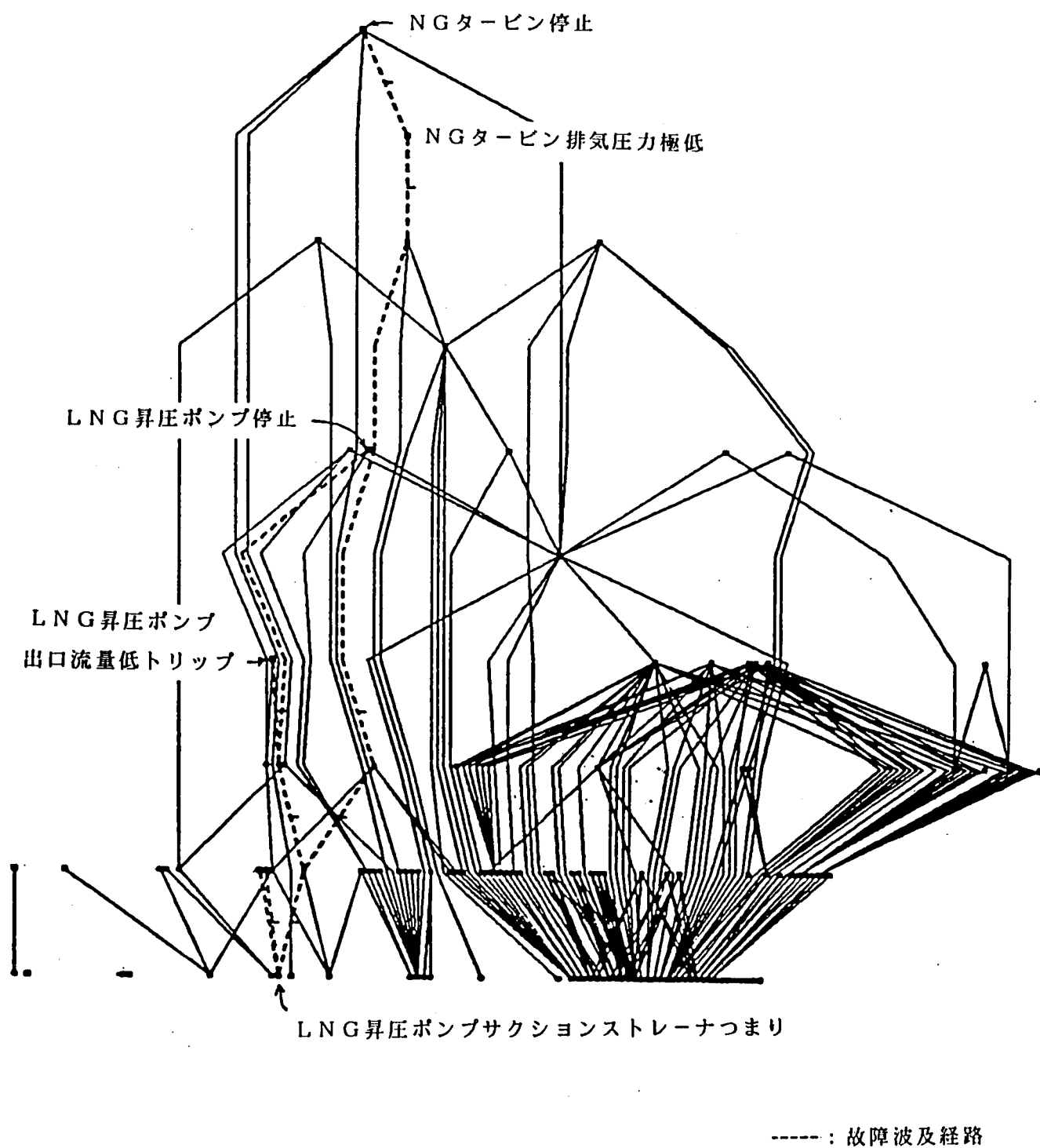


図5. 2 冷熱発電プラントの故障影響波及網における推定故障原因



表 5. 3 冷熱発電プラントの想定故障原因と故障原因推定結果

想定故障原因	推定順位	故障原因候補数
昇圧ポンプサクションストレーナ 異常閉塞	1	1
計装用空気配管異常圧力低下	1	1
遮断弁異常閉	1	1
冷熱海水入口弁異常閉	1	1
プライマリポンプ異常圧力低下	1	1
海水ポンプ吐出圧不足	1	1
FGタービンバイパス弁異常閉	1	1
フロンポンプサクションストレーナ 異常閉塞	1	1
第1加熱器伝熱管異常閉塞	1	2
第2加熱器伝熱管異常閉塞	1	2
第3加熱器伝熱管異常閉塞	1	2
フロン蒸発器伝熱管異常閉塞	1	1

## 5. 4 原子力プラント再循環系への適用

原子力プラント再循環系は、炉心で発生した熱を取り出すための冷却材を炉心へ強制循環させ、蒸気の発生を有効に行なうとともに、炉心冷却材再循環流量を変化させることにより、原子炉出力（発生蒸気量）を制御するものである。すなわち、原子炉出力を上昇させる場合には、冷却材再循環流量を増加させ、逆に出力を下降させる場合には冷却材再循環流量を減少させることにより原子炉出力制御を行なうものである。

故障影響波及範囲予測法は、5. 3. 1 項と同様に故障影響モデルのブラッシュアップに使用したので、以下では故障原因推定法の適用について示す。

### 5. 4. 1 適用結果

検討に当っては、2 系統からなる再循環系の一系統分のみを対象とし、故障要素として、135 要素を選んだ。

適用結果の一部を図 5. 3、図 5. 4 に示す。図 5. 3 は、故障影響波及網と RCW 2 ポンプ（64-0）を想定故障原因とした場合のセンサ異常検出時刻を、図 5. 4 は MG セット部の系統図と推定故障原因を示す。

### 5. 4. 2 結果の検討

表 5. 4 に示す 10 ケースの故障原因を想定し、各ケースごとに図 5. 3 の右側に示すようなセンサ異常検出時刻を与えた。

試験結果を表 5. 4 に示す。表中第 1 列は、想定した故障原因（10 ケース）、第 2 列は、故障原因推定を行なった結果、想定故障原因が候補中の第何位に順位付けられたかを示す値、第 3 列は故障原因候補として推定された故障要素の数である。

表 5. 4 から、ほぼ満足できる結果が得られることがわかる。

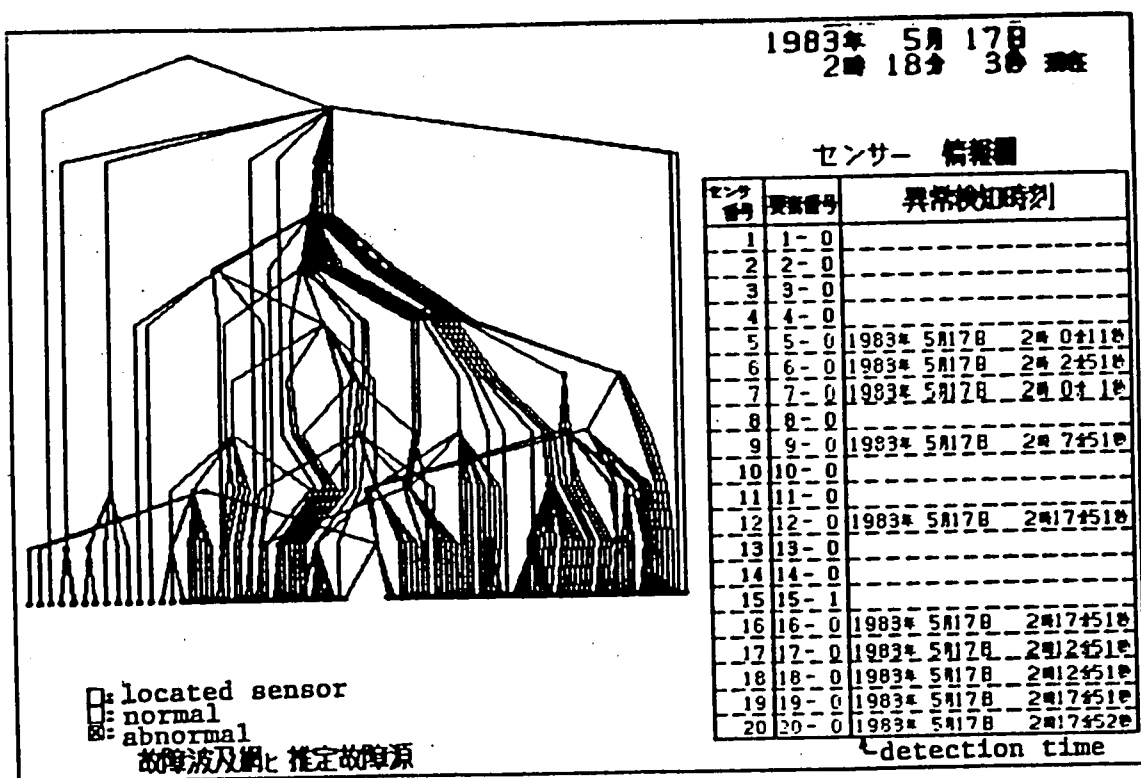
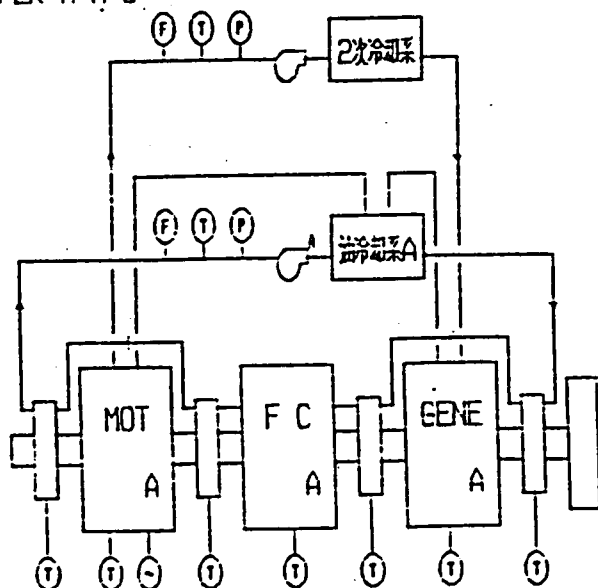


図 5. 3 原子力プラント再循環系の故障影響波及網と異常検出時刻

PLR A M-G



検出異常 故障位置

検出異常	故障位置
A系 S/T値ロック	1 A系 冷却系ポンプ故障
A系 冷却系流量 低	2 A系 冷却系流量低
A系 冷却系流量 高	2 A系 冷却系シール不良
A系 冷却系圧力 低	4 A系 冷却系電圧喪失
A系 MG-M電力計出力	4 A系 冷却系圧力計送信号
A系 MG電圧計出力	6 A系 冷却系流量計送信号
A系 ポンプモータ電力 低	7 A系 冷却系圧力スイッチ動作
A系 系統流量 低	8 A系 冷却系送風機49動作
A系 ポンプ圧 低	9 A系 冷却系電圧低
	9 A系 冷却系出入口弁動作

図 5. 4 原子力プラント再循環系MGセットと推定故障原因

表 5. 4 原子力プラント再循環系の想定故障原因と故障原因推定結果

想定故障原因	推定順位	故障原因候補数
R C W 2 ポンプ	1	1 0
制御回路	1	3
M G - M 過負荷	2	3
F C 温度計	1	5
メインポンプ	2	3
パイプ破損	2	7
油冷却系シール	2	1 1
漏水レベル計	1	3
ポンプ吐出弁	2	3
油冷却系ポンプ	1	1 2

## 5. 5 診断精度事前評価法の提案

前節までのアプローチは、重要な故障原因について事故シーケンスのシナリオを作成し、そのシナリオから予想されるセンサの出力パターンに対する故障原因推定結果について評価するものであった。したがって、診断精度の事前評価を行うためには対象モデルが大きくなると多数のセンサ出力パターンを想定しなければならず十分な評価は困難になる。そこで、本節では、与えられたモデルに基づいて、3. 4 節で示した方法により故障原因の推定を行う場合、センサ情報から各故障原因をどの程度まで絞り込むことができるかを評価する方法を提案する。本方法の特徴は異常検出からの経過時間に応じたセンサの出力パターンを生成し、照合するところにある。

### 5. 5. 1 モデルと前提条件

3. 4. 1 項と同じモデルと前提条件を使用する。

### 5. 5. 2 診断精度事前評価法

本方法は、ある要素が故障原因である場合に予想されるセンサの出力パターンと他の故障原因によるセンサ出力パターンとが一致するかどうかを調べることにより、故障原因の推定を行った場合に故障原因候補数を何個まで絞ることができるかを評価するものである。

最初に、3. 4. 2 項の〈ステップ1～4〉を実行し、最大異常検出時間行列  $E$  と最小異常検出時間行列  $G$  を求める。

以下では、最初の異常検出から経過時間  $t$  後に診断を開始する場合について考える。

〈ステップ5〉 すべての  $f$  ( $\in F$ )、 $s$  ( $\in S$ ) についてセンサ出力パターン  $o_{fs}(t)$

を次の手順で求める。

$$(i) \quad e_{fs} \leq t$$

ならば、 $f$  で故障が発生した場合に最初の異常検出から時間  $t$  以内に  $s$  で異常検出できるので、

$$o_{fs}(t) = 1$$

とする。

$$(ii) \quad g_{fs} > t$$

ならば、 $f$  で故障が発生した場合に最初の異常検出から時間  $t$  以内には  $s$  で異常検出できないので、

$$o_{fs}(t) = 0$$

とする。

(iii) その他の場合には、正常、異常のいずれの状態にもなりうるので、不定という意味で

$$o_{fs}(t) = x$$

とする。

<ステップ 6> すべての  $h (\neq f) (\in F)$  について、すべての

$$s'' (\in S'' = \{s \in S \mid o_{fs}(t) \neq x, \text{ かつ } o_{hs}(t) \neq x\})$$

について

$$o_{fs''}(t) = o_{hs''}(t)$$

が成立するかどうかを調べ、成立する  $h (\in f)$  の個数を求め、それに 1 を加えたものを  $n_f(t)$  とする。

故障影響波及モデルにおいて故障影響の波及時間が一定ならば、経過時間をセンサ出力パターンを規定する一つのパラメータと考えた場合、一意的にセンサ出力パターンが定まる。しかし、波及時間がある時間幅（最大値と最小値の差）をもつため、センサ出力パターンに不確定な部分が生じる可能性がある。そこで、不定値 ( $x$ ) を導入した。このことにより、<ステップ 5>において、最初の異常検出時刻から診断開始時刻までの経過時間に応じたセンサ出力パターンを生成できる。さらに、<ステップ 6>は状態が不定 ( $x$ ) であるセンサノードを除いてセンサ出力パターン照合を行ない、ノード  $f$  と同じパターンを持つものが幾つあるのかを求めている。したがって、 $n_f(t)$  はノード  $f$  が真の故障原因である場合、最初の異常検出から経過時間  $t$  後に診断した結果得られる故障原因候補の最大個数を表わす。

診断精度を診断の結果得られる故障原因候補集合の中で最大のものの大きさ<sup>36)</sup>と定義する

と、最初の異常検出時刻から経過時間  $t$  後の診断精度  $n(t)$  は次式で与えられる。

$$n(t) = \max_{f \in F} \{n_f(t)\}$$

### 5. 5. 3 計算例

3. 4 節 (図 3. 1 1) のモデルを用いて、診断精度の事前評価法の計算例を示す。

<ケース 1> 異常検出直後に診断を開始する場合 ( $t = 0$ )

<ステップ 5> 行列  $E$ 、 $G$  (図 3. 1 4) からセンサ出力パターン行列

$$O(0) = \{o_{fs}(0)\} (f \in F, s \in S)$$

を求める (図 5. 5)。

	10	11	12	13
1	X	0	0	0
2	0	X	0	0
3	0	0	X	0
4	0	0	0	X
5	0	0	X	0
6	1	0	0	0
7	0	1	0	0
8	0	0	1	0
9	0	0	0	1

図 5. 5 センサ出力パターン行列 ( $t = 0$ )

<ステップ 6> センサ状態が不定になるセンサノードを除いて、ノード 1 のセンサ出力パターンと同じパターンを持つノードは 2、3、4、5、6 である。したがって、

$$n_1(0) = 6$$

となる。同様に

$$n_2(0) = 6$$

$$n_3(0) = 6$$

$$n_4(0) = 6$$

$$n_5(0) = 5$$

$$n_6(0) = 2$$

$$n_7(0) = 2$$

$$n_8(0) = 3$$

$$n_9(0) = 2$$

である。したがって、診断精度は、

$$n(0) = 6$$

となる。

<ケース2> 最初の異常検出から60秒後に診断を開始する場合 ( $t = 60$ )

<ステップ5> 行列  $E$ 、 $G$  からセンサ出力パターン行列

$$O(60) = \{o_{fs}(60)\} \quad (f \in F, s \in S)$$

を求める (図5.6)。

<ステップ6> <ケース1>と同様に考えると、

$$n_1(60) = 2$$

$$n_2(60) = 2$$

$$n_3(60) = 3$$

$$n_4(60) = 2$$



$$n_6(60) = 3$$

$$n_6(60) = 2$$

$$n_7(60) = 2$$

$$n_8(60) = 3$$

$$n_9(60) = 2$$

であり、診断精度は

$$n(60) = 3$$

となる。

$$O(60) =$$

	10	11	12	13
1	1	0	0	0
2	X	1	0	0
3	0	X	1	0
4	0	X	X	1
5	0	X	1	0
6	1	0	0	0
7	0	1	0	0
8	0	0	1	0
9	0	0	0	1

図 5. 6 センサ出力パターン行列 ( $t = 60$ )

#### 5. 5. 4 適用例

ある発電プラントのサブシステムをモデル化し、診断精度の事前評価を行なった例について示す。故障影響波及モデルは全ノード数 729 個、そのうち故障原因候補ノード 486 個、センサノード 189 個であった（その他は二次故障原因である）。センサノードと

しては信号が中央操作盤にまで入力されるものを選んだ。最初の異常検出から10分後における診断精度について評価した結果を表5.5に示す。表5.5は、たとえば $n_f(t)$ が1となるノードが247個あり、それが故障原因候補ノード486個の51%にあたることを示している。なお、異常検出保障なしというノードは、すべての $s \in S$ について最大故障影響波及時間 $c_{fs}$ が $\infty$ であるもののことである。

評価結果を検討して、次のことがわかった。

- (1) 故障原因の95%は最初の異常検出から10分後には候補数を7個以内に絞れる。
- (2) 故障原因候補数が18個になるのは配管破断や漏洩である。これらは故障発生個所の自由度が大きいので、センサ情報の追加だけでは故障原因候補数を減らせない。この部分に関しては、モデルの再検討または統計的診断法<sup>37)</sup>の導入が必要である。
- (3) 故障原因候補数が19個になるのは制御系（計算機を含む）である。センサ情報を追加するか、または制御系には自己診断機能があるので制御系異常という一つのノードにまとめたほうがよい。
- (4) 異常検出保障なしとなるのは、特定の条件（弁の開、閉など）が成立しないと異常検出されないものである。

なお、本評価のためのCPU時間（汎用大型計算機HITAC M-200H）は10分であった。

表5.5 診断精度事前評価の結果

$n_f(600)$	ノード数	(%)
1	247	51
2	61	13
3	74	15
4	32	7
5	26	5
6	16	3
7	4	1
18	2	0
19	19	4
異常検出保証なし	5	1

## 5. 6 結 言

故障影響波及範囲予測法と故障原因推定法の予防保全設計への適用について述べた。火力発電プラント用液化石油ガス気化設備、冷熱発電プラント、原子力発電プラントに適用した結果より、次のことを示した。

(1) 故障影響波及範囲予測法により

(a) 高信頼化の必要な機器が指摘できること。

(b) 故障影響波及モデルをブラッシュアップできること。

(2) 故障原因推定法により、故障原因の可同定性を確認できること。

さらに、与えられた故障影響波及モデルにもとづいて故障原因の推定を行う場合、センサ情報を用いて、故障原因候補をどの程度まで絞れるかを事前に評価する診断精度事前評価法を提案した。本方法は、ある故障要素が故障原因である場合に予想されるセンサの出力パターンと他の故障原因によるセンサ出力パターンとが一致するか同かを調べることであり、故障原因の推定を行った場合に故障原因候補数を何個まで絞れるかを評価するものである。本評価法をある発電プラントへ適用した結果より、実用規模の問題に適用可能であることを示した。

## 第 6 章 結論

本研究では、大規模システムにおける異常検出時の運転員支援を目的とする故障影響波及範囲予測と故障原因推定に関する問題を対象とした。

第 2 章では、プラントにおける故障影響波及過程のネットワークモデルを提案し、このモデルにおける故障影響波及範囲予測法を提案した。提案モデルは、ノードにシステム構成機器の故障形態（以下、故障要素と呼ぶ）を対応させ、リンクに隣接故障要素間の故障影響波及関係を波及方向と波及時間を与えることで対応させたネットワークモデルであり、故障影響波及の時間遅れと故障形態間の論理関係（AND，OR）の両方を記述できるという特徴を持ち、従来モデルより記述能力において優る。さらに、ダミー要素を導入することにより、AND，OR 以外の論理関係も記述できることを示した。故障影響波及範囲予測法は、故障原因要素とその故障発生時刻が与えられたとき、提案モデルを用いてある時刻までに故障の影響を受ける故障要素を求めるものであり、故障影響波及の時間変化を定量的に予測する。Dijkstra法を拡張した提案手法は、AND，OR 論理関係を原因（入力）側と結果（出力）側に故障の影響が波及した時刻を用いて定式化し、故障原因要素から故障の影響を受ける時刻が早い順に故障要素を求めるという考え方を基本とする。ダミー枝を導入することにより、多重故障原因を単一故障原因と同じ手順で実行できることを示した。

第 3 章では故障原因推定法を提案した。大規模プラントを対象として、

- (1) センサからの異常情報を利用して故障原因候補を推定し、
- (2) センサからの正常情報、隣接 2 機器間の故障影響波及確率、隣接 2 機器間の故障影響波及時間を利用して故障原因候補を絞り、
- (3) 各機器の故障率、隣接 2 機器間の故障影響波及確率を用いて故障原因である可能性の順序付けを行なう、

故障原因推定法を提案した。さらに、提案手法をセンサ故障を含む場合も扱えるように拡張した。拡張の方法として、センサ誤作動故障を故障の因果関係の論理モデルの一構成要素として取り込んだ。この方法は、提案手法をそのままモデルに適用できるため、機器故障とセンサ誤作動故障が同一レベルで統一的に扱える。センサ不作動故障については、推定した故障原因から異常を検出したセンサまでの故障影響波及時間と正常状態を示しているセンサまでの波及時間とを比較し、矛盾がある場合に、正常状態を示しているセンサを不作動故障であると推定することで処理する。このアプローチは故障影響波及時間という定量的関係を利用している点に特徴があり、従来方法よりもセンサ故障の推定能力に関して優ることを示した。

さらに、ある要素が故障原因である場合に予想されるセンサが示す正常や異常の出力パターンを生成し、実際のパターンと照合するというアプローチをとる故障原因推定法を提案した。本方法の特徴は、最初の異常検出時刻を基準にして診断開始時刻までの経過時間に応じたセンサ出力パターンを生成するところにある。本方法は、故障原因推定システム

実用化における次の課題を解決するものである。

(1) 故障影響波及時間の誤差の問題

故障影響波及モデルに最大値と最小値を与え、生成するセンサ出力パターンに不確定部分の存在を認める。

(2) センサ故障仮定基準の問題

機器の故障確率より大きい発生確率を持つセンサ故障だけを仮定する。

第4章では、第2章、第3章における提案手法を原子力発電支援システム（インストラクションシステム）に適用した。故障波及予測・診断システム（FPS）は、異常を検出すると故障影響波及範囲予測法（第2章）によって予測された一定時間後に故障の影響が波及する範囲と故障原因推定法（第3章3.3節）によって推定された故障原因候補をCRT画面のシステム系統図上に示すことにより運転員を支援するものである。FPS開発においては、以下の課題について検討した。

(1) 入力信号のトランジェントな変動への対応

一度異常になったものはシステムが正常に復帰するまでは異常として扱う信号前処理アルゴリズムを開発した。

(2) 効果的適用対象

故障発生時の影響の度合いなど適用対象選択基準を設けて、原子力プラントの各種系統を評価し、FPSの効果が顕著に表われる再循環系と給復水系を選定した。

(3) 演算時間の十分性

作成した故障影響波及モデルをもとにFPSで故障原因推定と故障影響波及予測を行なった場合、演算時間がオンラインシステムとして十分であることを確認した。

(4) インストラクションシステムのサブシステムとしての有効性

検証試験の結果確認した。

第5章では、予防保全設計への適用について述べた。故障影響波及範囲予測法と故障原因推定法を火力発電プラント用液化石油ガス気化設備、冷熱発電プラント、原子力発電プラントに適用した結果より、次のことを示した。

(1) 故障影響波及範囲予測法により

(a) 高信頼化の必要な機器が指摘できること。

(b) 故障影響波及モデルをブラッシュアップできること。

(2) 故障原因推定法により、故障原因の可同定性を確認できること。さらに、与えられた故障影響波及モデルにもとづいて故障原因の推定を行う場合、センサ情報を用いて、故障原因候補をどの程度まで絞れるかを事前に評価する診断精度事前評価法を提案した。本方法は、ある故障要素が故障原因である場合に予想されるセンサの出力パターンと他の故障原因によるセンサ出力パターンとが一致するか同かを調べることにより、故障原因の推定を行った場合に故障原因候補数を何個まで絞れるかを評価するものである。本評価法はある発電プラントへ適用した結果より、実用規模の問題に適用可能であることを示した。

本研究で提案したアプローチは、

(1) 故障の因果関係の定性的モデルであるため適用が容易で、汎用性がある。

(2) 波及関係に故障影響波及時間を導入しているため波及の時間変化を定量的に捉えることが可能である。

(3) 故障影響の波及関係があらかじめ用意してあるため、演算時間が短い。

(4) 原因の推定、波及の予測が容易、  
という特長がある。しかし、

(1) 故障影響の波及関係が多数存在するため、因果関係をあらかじめ用意するのに要する作業量が多い。

(2) 表現能力に限界があり、扱える異常も限定されるため、あらかじめ考慮していない異常には対処できない、  
という問題がある。

因果関係に基づくアプローチに共通した上記の問題点を克服するアプローチは、近年急速に発展しつつある知識工学<sup>42,43)</sup>であると考えられている。これは、知識と推論機構を独立させているため、知識の修正、削除及び追加が容易となり、段階的な能力の向上が期待できるためである。知識工学をインストラクションシステムに適用するためには、知識の収集法、処理速度の向上が主要な課題となるであろう。

## 謝 辞

本研究は筆者が日立製作所システム開発研究所において行なった研究の成果を京都大学原子エネルギー研究所若林二郎教授のご指導のもとにまとめたものである。故服部嘉雄博士（当時、同研究所教授）、同大学工学部井上紘一教授には、論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を賜った。

本研究を進めるにあたって、下記の多くの方々にご指導、ご討論、ご協力を頂いた。ここに深謝致します。

日立製作所情報事業本部次長（当時、システム開発研究所所長）川崎淳博士には本研究の機会を与えて頂くとともに、暖かいご鞭撻を頂いた。同所システム開発研究所所長堂免信義氏、主管研究長三巻達夫博士、同所宇宙技術推進本部主管技師長（当時、システム開発研究所副所長）井原広一博士、同所システム開発研究所副所長春名公一博士には研究一般に関するご指導を頂くと共に良い研究環境を与えて頂いた。

バブコック日立横浜研究所主管研究員（当時、システム開発研究所主任研究員）新谷定則氏、日立製作所システム開発研究所主任研究員佐々木良一博士には本研究を進めるにあたり、終始激励を頂き、ご指導頂いた。

古河雅澄博士（当時、システム開発研究所研究員）には本研究の端緒を与えて頂き、研究の方向付けをして頂くとともに研究の推進にあたって終始ご指導いただいた。

日立工場技師村田扶美男氏、大みか工場主任技師橋本茂男氏には原子力プラントへの適用についてご助言を頂き、貴重なデータを提供して頂いた。笠戸工場主任技師喜多修氏、岡田建夫氏には液化石油ガスプラントおよび冷熱発電プラントへの適用についてご助言を頂き、貴重なデータを提供して頂いた。日立工場（当時、システム開発研究所企画員）八木郭之氏には原子力プラントへの適用にあたって、モデリング、計算機シミュレーション等でご協力を頂いた。日立工場（当時、システム開発研究所実習員）高橋利幸氏には故障原因推定法の計算機プログラムによる有効性の検証にご協力を頂いた。

上記以外にも、多くの日立製作所の諸先輩、同僚にご好意あふれるご激励とご援助を頂いた。

## 参考文献

- 1) 井爪昭忠：外乱解析と監視，計測と制御，Vol.20，No.11，pp.1030-1035  
(昭和56年)
- 2) Buttner, W. E. et al. : Functions and Design Characteristics of the STAR Disturbance Analysis System, IAEA Specialists' Meeting on NPPCI, Munich, Germany (1979)
- 3) Meijer, C. H. & Frogner, B. : On-Line Power Plant Alarm and Disturbance Analysis System, EPRI-Report NP-1379, Palo Alto (1980)
- 4) Iri, M. et al. : A Graphical Approach to the Problem of Locating the Origin of the System Failure, J. Oper. Res. Soc. Japan, Vol.23, No.4, pp.295-312 (1980)
- 5) 古河雅澄，塩谷真，大成幹彦：故障波及過程モデル化の一研究，信学論，Vol.63-A，No.3，pp.197-203 (昭和55年)
- 6) U. S. Atomic Energy Commission : Reactor Safety Study, WASH-1400 (1974)
- 7) Umeda, T. et al. : A Graphical Approach to Cause and Effect Analysis of Chemical Processing System, Chemical Engineering Sci., Vol.35, pp.2379-2388 (1980)
- 8) 古河雅澄：多入力多出力網における機能生存経路探索法，信学論，Vol.63-A，No.9，pp.619-622 (昭和55年)
- 9) 古河雅澄，新谷定則，喜多修：故障波及シミュレータによる Boil Off Gas処理設備の安全性解析，第20回SICE学術講演会，pp.361-362 (昭和56年)
- 10) 宮崎聡，古河雅澄，新谷定則，岡田建夫：故障波及シミュレータによるLPGボンブ・気化設備の安全性解析，昭和56年電学東京支部大会予稿集，pp.430-431
- 11) 宮崎聡，古河雅澄，新谷定則：ネットワークシステムにおける複合故障時の故障波及範囲予測法，昭和57年電学全国大会予稿集，pp.1803-1804



- 1 2) 宮崎聡, 古河雅澄, 新谷定則: 大規模プラントにおける故障影響波及過程のネットワークモデル, 1983年度日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.61-62
- 1 3) 宮崎聡, 古河雅澄, 新谷定則: プラントにおける故障影響波及過程のネットワークモデル, 電学論, Vol.104-C, No.2, pp.43-47 (1984)
- 1 4) Miyazaki, S., Kokawa, M., Shingai, S. : Network Model of Failure Propagation Process in a Plant, Electrical Engineering in Japan, Vol.104C, No.1, pp.129-134 (1984)
- 1 5) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則: 有向グラフ逆方向探索によるシステムの故障源推定法, 昭和57年電学全国大会予稿集, pp.1801-1802
- 1 6) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則: 時間・確率付有向グラフ逆方向探索による故障源推定法, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.12, pp.1140-1144 (1982)
- 1 7) Kokawa, M., Miyazaki, S., Shingai S. : Fault Location Using Digraph and Inverse Direction Search with Application, Automatica, Vol.19, No.6, pp.729-735 (1983)
- 1 8) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則, 岡田建夫: システムの故障源推定法と気化設備への適用, 昭和58年電学全国大会予稿集, pp.1859-1860
- 1 9) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則, 村田扶美男, 橋本茂男: 故障源推定システムと原子力プラントへの適用性の検討, 昭和59年電学全国大会予稿集, pp.1716-1717
- 2 0) Kokawa, M., Miyazaki, S., Shingai, S., Murata, F., Hashimoto, S. : Fault Location Using Digraph with Application to Boiling Water Reactor, IAEA Specialists' Meeting on Systems and Methods for Aiding Nuclear Power Plant Operators During Normal and Abnormal Conditions, Balatonaliga, Hungary (1983)
- 2 1) 宮崎聡, 古河雅澄, 新谷定則: センサ故障を含む条件下での故障原因推定法, 昭和59年電学全国大会予稿集, pp.1720-1721
- 2 2) 宮崎聡, 古河雅澄, 新谷定則: センサ故障を含む条件下での故障原因推定法, 電学論, Vol.105-C, No.4, pp.87-91 (1985)

- 23) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則: 故障波及予測・診断システムの一構成法, 第25回自動制御連合講演会予稿集, pp.387-388 (昭和57年)
- 24) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則: 故障波及予測・診断システムと実プラントへの適用, SICE第9回システムシンポジウム講演論文集, pp.273-278 (1983)
- 25) 古河雅澄, 宮崎聡, 新谷定則: 故障波及予測・診断システムの開発, 計測と制御, Vol.23, No.8, pp.672-684 (1984)
- 26) 古河雅澄, 高橋利幸, 宮崎聡, 新谷定則: プラントの保全設計支援用会話型故障波及予測システムの開発, 昭和59年電学全国大会予稿集, pp.1718-1719
- 27) 八木郭之, 古河雅澄, 宮崎聡, 佐々木良一: 原子力発電プラントにおける故障波及予測・診断システムの計算時間評価, 昭和60年電学全国大会予稿集, pp.1965-1966
- 28) 宮崎聡, 古河雅澄, 八木郭之, 佐々木良一: センサ異常パターン照合型故障原因推定法と可診断性評価法, 昭和60年電学全国大会予稿集, pp.1976-1977
- 29) 宮崎聡, 古河雅澄, 八木郭之, 佐々木良一: ネットワークモデルに基づくセンサ出力パターン照合形故障原因推定法, 電学論, Vol.106-C, No.7, pp.135-140 (昭和61年)
- 30) Kokawa, M. & Shingai, S.: Failure Propagation Simulation and Nonfailure Paths Search in Network Systems, Automatica, Vol.18, No.3, pp.335-341 (1982)
- 31) Dijkstra, E. W.: A Note on Two Problems in Connection with Graphs, Numerische Mathematik, Vol.1, p.269-271 (1959)
- 32) IEEE Std 500-1977: Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronics and Sensing Component Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations
- 33) 荻野, 他: プラント事象データベースを用いた診断法の開発, SICE第8回システムシンポジウム講演論文集, pp.385-390 (昭和57年)
- 34) 高見勲, 崎野悦司: 異常検知センサシステムの信頼性, システムと制御, Vol.24, No.11, pp.726-734 (昭和55年)

- 35) 大島栄次：シミュレーションと異常診断，電学誌，Vol.99，No.3，pp.195-199  
(昭和54年)
- 36) 柘植義文，松山久義：化学プラントの異常診断システム，信学技報，Vol.84，  
No.157，R84-23 (昭和59年)
- 37) 中溝高好，秋月影雄，添田喬：システムの統計的故障検知法，計測と制御，  
Vol.18，No.6，pp.471-480 (昭和54年)
- 38) 村田扶美男，橋本茂男，木口高志，佐々木良一：原子力発電支援システムの開発  
－インストラクションシステム－，日立評論，Vol.67，No.12，pp.79-84 (1985)
- 39) 村田扶美男，東川裕一，福西宏有，大賀幸治，橋本茂男，古河雅澄：BWR事故  
時インストラクションシステムの開発，昭和60年電気学会全国大会，pp.1967-1968
- 40) Murata, F., Kato, K., Hashimoto, S. : Development of BWR Computerized  
Operator Support System for Emergency Conditions, IAEA-SM-268/20, Marseilles,  
France (1983)
- 41) Hashimoto, S., Miyake, M., Murata, F., Fukunishi, K. : Advanced Monitor,  
Control, Diagnosis and Guidance Systems for Nuclear Power Plants, AIM-Liege,  
Modern Power Stations (1985)
- 42) 佐田登志夫，高田祥三：設備診断技術の現状と将来，計測と制御，Vol.25，No.10，  
pp.863-870 (昭和61年)
- 43) 出海滋，木口高志：異常診断のための情報処理，計測と制御，Vol.25，No.10，  
pp.871-878 (昭和61年)
- 44) Lombardo, T. G. : TMI Plus 2, IEEE Spectrum, Vol.18, No.4, pp.28-44  
(1981)
- 45) 野下浩平，高岡忠雄，町田元：基本的算法，岩波講座情報科学10 (1983)
- 46) Floyd, R. W. : Algorithm 97 - Shortest Path, Comm. ACM, Vol.5, No.6,  
p.345 (1962)

47) 牧野真臣, 福田泰義, 藤平一重: 原子力発電所におけるデジタル計測制御システム, 電学誌, Vol.106, No.6, pp.553-560 (昭和61年)

48) 辛島ほか: L N G 冷熱発電設備の概要, 電学誌, Vol.101, No.12, pp.1188-1191 (昭和56年)

# 付録

## 付録 1     D i j k s t r a 法<sup>31,45)</sup>

枝の長さが非負の実数値をとるとき、あるノード  $v_0$  から出発して、 $v_0$  以外のすべてのノードへ至るための最短距離を求める問題を考える。経路の距離とは、その経路に属す枝の長さの総和のことであり、ノード  $u$  から  $v$  への最短距離とは、 $u$  から  $v$  への経路の中で最小の距離を与えるものであると定義される。そして、この最小の距離のことを最短距離という。

Dijkstra法とは、基本的にはあるノード  $v_0$  から出発し、 $v_0$  からの距離が最小のノードから順に訪問するというものである。次に訪問されるべきノードを保持している集合  $F$  は、ノード  $u$  と、 $v_0$  から  $u$  への距離  $d[u]$  との対  $(u, d[u])$  の集合であり、次の条件を満たすものである。

(条件 1)  $u$  は未訪問。

(条件 2)  $d[u]$  は、途中に訪問済のノードだけを通して  $v_0$  から  $u$  へ至る経路の最短のもの距離。

ここで、訪問済のノードの集合を  $S$  と呼ぶ。集合  $F$  の中で、 $d[v]$  が最小になるノード  $v$  を次に訪問すれば、すなわち  $S$  に取り込めば良いことになる。 $S$  は  $v_0$  からの最短距離の判明したノードの集合であって、 $v$  へは、これより短い経路は考えられない。その後、 $v$  に隣接するノードで、 $S$  と  $F$  に属さないものについては、それを  $F$  に取り込むと共に、 $F$  内の  $v$  以外のノード  $w$  について、 $v$  経由の場合の方が短くなる場合は  $w$  への距離  $d[w]$  の値を更新する。

以上の考え方をまとめたものが付図 1 に示すアルゴリズムである。なお、このアルゴリズムで、 $l(u, v)$  は、ノード  $u$  から  $v$  への枝があるとき、その長さを表す。アルゴリズムが終了した時点で、各ノード  $v$  に対し、 $d[v]$  に  $v_0$  から  $v$  への最短距離が得られている。

```

1  begin
2      すべてのノードの集合 V のすべてのノードに "未訪問" の印を付ける ;
3       $v_0$  に "訪問済" の印を付ける ;
4       $d[v_0] := 0$  ;
5      for ノード  $v$  から出る枝の集合  $OUT(v_0)$  の各ノード  $v$  do
6           $d[v] := l(v_0, v)$  ;
7           $F := \{(v, d[v]) \mid v \in OUT(v_0)\}$  ;
8      while  $F \neq \phi$  do
9          begin
10              $v := F$  の中で  $d[u]$  が最小になる  $u$  ;
11              $F := F - \{(v, d[v])\}$ 
12              $v$  に "訪問済" の印を付ける ;
13             for  $OUT(v)$  の各ノード  $w$  do
14                 if  $w$  が "未訪問" then
15                     if  $(w, d[w]) \in F$  then
16                          $d[w] := \min\{d[w], d[v] + l(v, w)\}$ 
17                     else begin  $d[w] := d[v] + l(v, w)$  ;
18                          $F := F \cup \{(w, d[w])\}$ 
19                     end
20             end
21         end
22     end

```

付図 1 Dijkstra法<sup>45)</sup>

## 付録 2      F l o y d 法<sup>45,46)</sup>

枝に長さの付されたグラフが与えられたとき、あらゆるノードの対の間の最短距離を求める問題を考える。

本問題を解くFloyd法のアルゴリズムを付図 2 に示す。ここで、 $l(i, j)$  は枝  $(i, j)$  の長さであるが、枝  $(i, j)$  が無いときは  $+\infty$  (十分大きな数) としておく。

$D^{(k)}[i, j]$  の値は、両端の  $i, j$  は別として、途中に経由するノードとして、1, 2, ...,  $k$  のみが許される状況で、ノード  $i$  から  $j$  への最短経路の距離を与えている。アルゴリズムの実行後、 $D^{(n)}[i, j]$  がノード  $i$  から  $j$  への最短距離を与える。

```

1  begin
2    for i := 1 to n do for j := 1 to n do
3       $D^{(0)}[i, j] := l(i, j)$  ;
4    for i := 1 to n do  $D^{(0)}[i, i] := 0$  ;
5    for k := 1 to n do
6      for i := 1 to n do for j := 1 to n do
7         $D^{(k)}[i, j] :=$ 
8           $\min \{ D^{(k-1)}[i, j], D^{(k-1)}[i, k] + D^{(k-1)}[k, j] \}$ 
9    end

```

付図 2      Floyd法<sup>45)</sup>